



TUGAS AKHIR - TE 141599

**KOORDINASI PROTEKSI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN
ARC FLASH PADA PT. PERTAMINA JOB MEDCO ENERGI
TOMORI FIELD SENORO**

Rizanni Pradana Abiddien
NRP 2215 105 085

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
Dimas Fajar Uman Putra, ST, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**KOORDINASI PROTEKSI DENGAN MEMPERTIMBANGKAN
ARC FLASH PADA PT. PT. PERTAMINA JOB MEDCO
ENERGI TOMORI FIELD SENORO**

Rizanni Pradana Abiddien
NRP 2215 105 085

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dimas Fajar Uman Putra, ST, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***PROTECTION COORDINATION BY CONSIDERING ARC
FLASH ON PT. PERTAMINA JOB MEDCO ENERGI TOMORI
FIELD SENORO***

Rizanni Pradana Abiddien
NRP 2215 105 085

Advisors

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dimas Fajar Uman Putra, ST, MT

***DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018***

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Koordinasi Proteksi Dengan Mempertimbangkan Arc Flash Pada PT. Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2018



Rizanni Pradana Abiddien
NRP. 2215 105 085

Halaman ini sengaja dikosongkan

**KOORDINASI PROTEKSI DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA
PT. PERTAMINA JOB MEDCO ENERGI TOMORI
FIELD SENORO**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Margo Pujiatara, MT.
NIP. 196603181990101001

Dimas Fajar Uman Putra, ST, MT.
NIP. 198811082012121001



**SURABAYA
JANUARI, 2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**KOORDINASI PROTEKSI MEMPERTIMBANGKAN ARC
FLASH PADA PT PERTAMINA JOB MEDCO ENERGI
TOMORI FIELD SENORO**

Rizanni Pradana Abiddien
2212100085

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

Dosen Pembimbing 2 : Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T..

ABSTRAK

PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro sejak berdiri hingga kini belum pernah di lakukan studi penelitian koordinasi proteksi mempertimbangkan busur api. Karena keandalan serta keamanan sebuah sistem kelistrikan adalah syarat utama yang harus dipenuhi maka studi busur api harus dilakukan.

Pada tugas akhir ini menganalisa perhitungan *setting* sistem koordinasi proteksi serta mempertimbangkan insiden busur api demi menyempurnakan keamanan sistem jaringan. Rele yang digunakan meliputi rele arus lebih dan rele *ground fault*. Variabel terpenting yang berpengaruh pada insiden energi adalah Fault Clearing Time (FCT). Sehingga koordinasi proteksi yang baik dapat mengurangi insiden energi dari busur api itu sendiri. Dari analisa busur api akan didapatkan nilai energi busur api dengan standar NFPA-70E level 0 hingga 4 sebagai acuan penentuan Alat Pelindung Diri (APD) untuk pekerja.

Kata kunci : busur api, koordinasi proteksi, insiden energy, Alat Pelindung Diri (APD)

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PROTECTION COORDINATION BY CONSIDERING ARC
FLASH ON PT. PERTAMINA JOB MEDCO ENERGI TOMORI
FIELD SENORO**

Rizanni Pradana Abiddien
2212100085

1st Advisor : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
2nd Advisor : Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T..

ABSTRACT

PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro since its establishment up to now has never done research on coordination studies of protection considering the arc. Due to the reliability and safety of an electrical system are the main requirements that must be met then the arc study must be done.

In this final project analyze the calculation of protection coordination system and consider incident of arc to improve network system security. The relays used include the overcurrent relay and the ground fault relay. The most important variable that affects energy incidents is Fault Clearing Time (FCT). Thus a good coordination of protection can reduce the incidence of energy from the arc itself. From the arc analysis will get the value of arc energy with NFPA-70E standard level 0 to 4 as a reference for the determination of Personal Protective Equipment (PPE) for workers.

Keyword : *protection coordination, overcurrent relay, insident energy, personal protective equipment (PPE)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: **“Koordinasi Proteksi Mempertimbangkan Arc Flash pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro”**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir, terutama kepada :

1. Ayah, Ibu, dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan semangat dan doa yang tidak terbatas.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara dan Bapak Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, saran, serta masukan yang sangat berarti bagi penulis.
3. Seluruh dosen jurusan Teknik Elektro yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh kuliah.
4. Teman-teman di jurusan Teknik Elektro ITS Lintas Jalur 2015 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang selalu memberikan sumbangan pemikiran serta semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Dan semua pihak yang belum penulis sebutkan.

Besar harapan penulis bahwa buku Tugas Akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro pada khususnya.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi dan Manfaat.....	4
BAB II LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Gangguan Arus Lebih	7
2.1.1 Gangguan Beban Lebih	7
2.1.2 Gangguan Hubung Singkat	7
2.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat	7
2.2.1 Hubung Singkat Tiga Fasa	8
2.2.2 Hubung Singkat Antar Fasa	8
2.3 Rele Arus Lebih (<i>Overcurrent Relay</i>)	10
2.3.1 Rele Arus Lebih Waktu Invers (<i>Inverse</i>)	10
2.3.2 Rele Arus Lebih Waktu Instan (<i>Instantaneous</i>).....	11
2.4 <i>Setting</i> Rele Arus Lebih	12
2.4.1 <i>Setting</i> Rele Arus Waktu Invers	12
2.4.2 <i>Setting</i> Rele Arus Lebih Instan	13
2.5 Koordinasi Proteksi Berdasarkan Arus dan Waktu	13
2.6 Busur Api (<i>Arc Flash</i>)	13
2.6.2 <i>Lee Method</i>	17
2.6.3 <i>Flash Protection Boundary</i>	17
2.6.4 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i>	18
2.6.5 Pengelompokan Tingkatan Energi Busur Api Sesuai dengan <i>Personal Protective Equipment (PPE)</i>	19

BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT PERTAMINA JOB MEDCO ENERGI TOMORI FIELD SENORO	21
3.1 Sistem Kelistrikan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	21
3.2 Kapasitas Pembangkitan.....	21
3.3 Sistem Distribusi di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	22
BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISA	25
4.1 Sistem Kelistrikan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	25
4.2 Tipikal Koordinasi Proteksi PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro.....	25
4.3 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat.....	26
4.3.1 Hubung Singkat Minimum.....	26
4.3.2 Hubung Singkat Maksimum.....	27
4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa	28
4.4.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 1	28
4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2	39
4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3	46
4.5 Koordinasi Rele Arus Gangguan ke Tanah	54
4.6 Analisa Nilai Energi Busur Api (<i>Arc Flash</i>)	58
BAB V PENUTUP	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran.....	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Flowchart Metodologi Tugas Akhir	3
Gambar 2.1	Hubung Singkat Tiga Fasa.....	8
Gambar 2.2	Hubung Singkat Antar Fasa.....	9
Gambar 2.3	Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah.....	9
Gambar 2.4	Karakteristik Kurva Very Inverse, Standard Inverse dan Extremely Inverse	10
Gambar 2.5	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan.....	11
Gambar 2.6	Karakteristik Kurva Integrasi Rele Arus Lebih Waktu Invers dan Instan	11
Gambar 2.7	<i>Arching Fault dan Bolted Fault</i>	14
Gambar 2.8	Efek yang Ditimbulkan <i>Arc Fault</i>	14
Gambar 2.9	Batas Pendekatan Jarak Flash Protection Boundary	18
Gambar 2.10	<i>Personal Protective Equipment (PPE)</i>	20
Gambar 3.1	Single Line Diagram PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	21
Gambar 4.1	Pemodelan masing - masing tipikal	26
Gambar 4.2	Tipikal koordinasi 1.....	28
Gambar 4.3	Plot kurva rele pengaman eksisting tipikal 1	29
Gambar 4.4	Urutan Dan Waktu Kerja Rele Eksisting Tipikal 1	30
Gambar 4.5	Plot Kurva Rele Pengaman Resetting Tipikal 1.....	36
Gambar 4.6	Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 1 ketika gangguan pada bus ES-9020.....	38
Gambar 4.7	Urutan dan waktu kerja rele resetting.....	39
Gambar 4.8	Tipikal koordinasi 2.....	40
Gambar 4.9	Plot Kurva Rele Pengaman Eksisting Tipikal 2	40
Gambar 4.10	Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 2	44
Gambar 4.11	Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 2 ketika gangguan pada bus ES-9010.....	45
Gambar 4.12	Urutan dan waktu kerja rele resetting.....	46
Gambar 4.13	Tipikal koordinasi 3.....	47
Gambar 4.14	Plot kurva rele pengaman eksisting tipikal 3	47
Gambar 4.15	Urutan dan waktu kerja rele eksisting tipikal 3	48
Gambar 4.16	Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 3	52
Gambar 4.17	Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 3 ketika gangguan pada bus ES-9050.....	53
Gambar 4.18	Urutan dan waktu kerja rele resetting.....	54

Gambar 4.19Single line diagram tipikal 5 gangguan fasa ke tanah55

Gambar 4.20Plot Kurva Rele Pengaman Arus Gangguan Tanah
Eksisting.....55

Gambar 4.21Plot Kurva Rele Pengaman Arus Gangguan Ke Tanah
Resetting57

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Koefisien Invers Time Dial	12
Tabel 2.2 Tipikal Gap Antar Bus	16
Tabel 2.3 Tipikal Jarak Kerja	16
Tabel 2.4 Faktor Peralatan dan Kelas Tegangan.....	17
Tabel 2.5 Pengelompokan Kategori Bahaya Busur Api Berdasarkan NFPA 70E	19
Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkit PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	22
Tabel 3.2 Data Level Tegangan Bus di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	22
Tabel 3.3 Data Rangkuman Pembangkitan dan Pembebanan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	23
Tabel 3.4 Data transformator sistem distribusi PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro	23
Tabel 4.1 Data Arus Hubung Singkat Minimum	27
Tabel 4.2 Data Arus Hubung Singkat Maksimum	27
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Existing.....	58
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Resetting.....	60
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting.....	68
Tabel 4.6 Perbandingan Besar Insiden Energi dan Kategori Level Busur Api Kondisi Existing, Resetting dan Hitungan	73
Tabel 4.7 Perbandingan Flash Protection Boundary Kondisi Existing, Resetting dan Hitungan.....	74
Tabel 4.8 Penentuan PPE Berdasarkan Kategori Level Busur Api	76

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perusahaan Pemasok gas alam cair (Liqueified Natural Gas) internasional PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro berusaha tetap menjaga kontinuitas produksi untuk memenuhi permintaan pasar. Sebagai upaya maka diperlukan keandalan serta keamanan dari sistem kelistrikan tersebut. Maka dari itu sistem proteksi yang baik tidak hanya peralatan yang berkualitas tetapi penentuan parameter *setting* yang tepat dan mempertimbangkan busur api sangat diperlukan.

PT. Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro hingga hari ini sejak berdiri belum pernah dilakukan analisa untuk keamanan serta keandalan nya. Maka harus dilakukan studi koordinasi proteksi mempertimbangkan busur api untuk menjamin kelayakan dari sistem kelistrikan secara keseluruhan.

Pengamanan beban bersifat selektif dan akurat saat terjadi gangguan. Jika tidak akan terjadi kesalahan urutan trip dan juga dapat menimbulkan insiden energi busur api (*Arc Flash*) yang berbahaya bagi pekerja. Jenis gangguan nya adalah hubung singkat. Peralatan yang digunakan adalah rele arus lebih (*overcurrent relay*). Rele arus lebih bekerja dengan cara *sensing* (merasakan) arus yang mengalir dan mengirimkan sinyal ke CB agar melindungi gangguan hubung singkat dan beban lebih.

Agar sistem kelistrikan aman dan proses produksi tidak terganggu maka PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senorowajib melakukan koordinasi proteksi yang tepat dan baik. *Setting* rele yang tepat dapat mengamankan bagian sistem yang terkena gangguan saja dan tidak mengganggu bagian sistem lainnya yang tidak terkena gangguan. *Setting* rele yang tepat juga bisa berdampak baik pada analisa energi busur api. Analisa energi busur api akan berkurang jika koordinasi proteksi baik dan tepat. setelah dianalisa dan diperhitungkan energi busur api maka didapatkan nilai insiden energ busur api yang berdasar pada IEEE 1584-2002 dan penentuan Alat Pelindung Diri (APD) atau dikenal juga dengan *Personal Protective Equipment (PPE)* untuk para pekerja sesuai level energi busur api berstandar NFPA 70E.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro belum pernah dilakukan studi kelayakan proteksi dan energi busur api sejak berdiri hingga sekarang.
2. Evaluasi terhadap sistem proteksi di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro untuk mendapatkan koordinasi proteksi yang tepat agar dapat meminimalkan energi busur api yang timbul.
3. Caraantisipasi bahaya insiden energy busur api dan safety untuk pekerja sesuai standar NFPA 70E.

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Melakukan simulasi dan menganalisis sistem kelistrikan pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro.
2. Melakukan studi koordinasi dan *setting* proteksi rele arus lebih fasa yang tepat, agar nilai insiden energi busur api dapat diminimalisir.
3. Mengetahui level insiden energi busur api yang timbul saat gangguan sehingga dapat direkomendasikan alat pelindung diri bagi pekerja.

1.4 Batasan Masalah

Untuk penyelesaian tugas akhir ini maka perlu diberi batasan sebagai berikut:

1. Analisa dilakukan di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro.
2. Analisa difokuskan hanya koordinasi rele arus lebih fasa dan perhitungan insiden energi busur api.
3. Standar IEEE 1584-2002 sebagai perhitungan busur api.

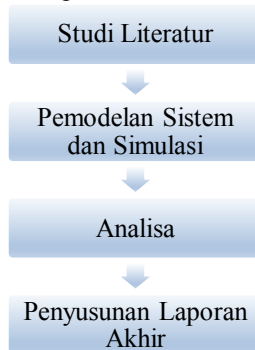
1.5 Metodologi

Tahapan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Untuk menunjang penguasaan tugas akhir ini diperlukan pengumpulan pustaka untuk studi literature. Teori seperti analisa

- aliran daya, analisa hubung singkat, pengaman sistem tenaga listrik serta perhitungan insiden energi busur api.
2. Pengambilan Data
Data yang diperlukan pada tugas akhir ini adalah *single line diagram* PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro, rating generator, transformator, motor, dan beban lainnya. *Circuit breaker*, kabel, *busbar*, dan *setting* rele eksisting.
 3. Pemodelan Sistem dan Simulasi
Pemodelan *single line diagram* sistem serta penentuan tipikal pada software ETAP. Setelah dilakukan pengumpulan data dan pemodelan sistem maka dapat dilakukan simulasi untuk memperoleh data yang diperlukan
 4. Analisa
Hasil dari simulasi seperti analisa aliran daya dan hubung singkat digunakan untuk *setting* koordinasi rele pengaman yang terpasang pada sistem. Agar mengetahui koordinasi yang tepat maka setelah melakukan koordinasi dilakukan analisa skema dengan berbagai macam lokasi dan letak gangguan. Setelah itu dapat dilakukan analisa insiden energi busur api yang terjadi pada sistem
 5. Penyusunan Laporan Tugas Akhir
Penyusunan laporan berdasarkan hasil analisa dan kesimpulan tugas akhir yang telah dikerjakan. Penyusunan buku dilakukan sebagai laporan dari proses serta hasil tugas akhir



Gambar 1.1 Flowchart *Metodologi Tugas Akhir*

1.6 Sistematika Penulisan

Pada tugas akhir ini terdiri beberapa bagian dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab I : Pendahuluan

Bab I ini berisi latar belakang permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi pengerjaan, sistematika penulisan dan pembahasan.

Bab II : Koordinasi Proteksi Sistem Tenaga Listrik dan Energi Busur Api

Bab II ini memberikan penjelasan mengenai teori – teori yang berkaitan dalam pengerjaan tugas akhir ini seperti jenis gangguan , sistem koordinasi proteksi dan energi busur api sesuai dengan IEEE 1584-2002 serta standar NFPA 70E sebagai standar alat pelindung diri

Bab III : Sistem Kelistrikan PT Pertamina Job Medco Energi Tomori Field Senoro

Bab III ini memberikan penjelasan tentang sistem kelistrikan pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro meliputi spesifikasi seperti konfigurasi sistem, kapasitas pembangkit, transmisi, distribusi, pentanahan dan beban

Bab IV : Simulasi dan Analisa Busur Api Pada PT Pertamina Job Medco Energi Tomori Field Senoro

Pada bab IV ini akan dijelaskan mengenai perhitungan dan hasil simulasi koordinasi proteksi dan energi busur api yang telah dilakukan. Serta rekomendasi untuk alat pelindung diri pekerja sesuai standar

Bab 5 : Penutup

Bab V ini berisi kesimpulan dari hasil analisa yang telah dilakukan serta saran yang berhubungan dengan hasil tugas akhir ini agar menjadi lebih baik kedepanya

1.7 Relevansi dan Manfaat

Dari hasil yang didapat dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro melalui tugas akhir ini, meliputi penentuan *setting* proteksi serta rekomendasi jarak aman pekerja dan pemilihan alat pelindung diri (APD) pekerja sebagai acuan pada sistem kelistrikan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro.

2. Dapat menjadi referensi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah serupa pada tugas akhir dan bidang ilmu pengetahuan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

LANDASAN TEORI

Bagian yang sangat penting dalam suatu sistem kelistrikan adalah sistem proteksi sebagai penunjang dan menjaga kontinuitas proses produksi dalam industri. Selain menjaga peralatan dari gangguan hubung singkat, proteksi juga harus bisa mengisolasi daerah yang tidak mengalami gangguan. Sehingga daerah yang mengalami gangguan tidak memperluas daerah gangguannya dan meminimalisir kerugian yang timbul. Selain itu busur api yang berbahaya bagi pekerja dan peralatan juga harus dipertimbangkan. Sehingga sistem tidak mengalami mati total (*blackout*) dan meminimalisir energi busur api yang timbul

2.1 Gangguan Arus Lebih

Gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubung singkat (*short circuit*) adalah gangguan yang umumnya terjadi pada suatu sistem kelistrikan.

2.1.1 Gangguan Beban Lebih

Overload atau gangguan beban lebih adalah kejadian dimana arus yang mengalir besarnya melebihi arus nominal yang diperbolehkan ($I > I_n$). Ketika arus yang melebihi kapasitas dari peralatan sehingga apabila dibiarkan maka dapat merusak peralatan tersebut.

2.1.2 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dibagi menjadi dua yaitu hubung singkat simetri dan asimetri (tak simetri). Gangguan hubung singkat simetri adalah hubung singkat 3 fasa. Sedangkan asimetri yaitu 1 fasa ke tanah, antar fasa, serta dua fasa ke tanah.

Dari statistik yang telah terjadi gangguan hubung singkat yang sering terjadi adalah gangguan asimetri. Gangguan ini menyebabkan lonjakan arus pada fasa yang mengalami gangguan yang mengakibatkan kerusakan pada peralatan.

2.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Rumus perhitungan besar arus hubung singkat yang mengalir saat terjadi gangguan hubung singkat berdasarkan kategori terjadinya gangguan sebagai berikut [1]:

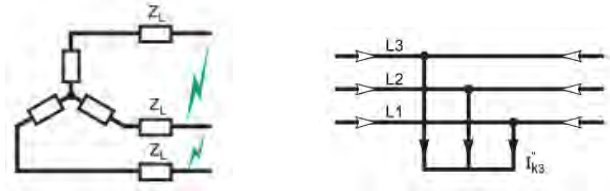
2.2.1 Hubung Singkat Tiga Fasa

Hubung singkat yang terjadi ketika ketiga fasa terhubung menjadi satu titik, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$I_{sc} 3\phi = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (2.1)$$

Dimana V_{LN} = tegangan *line to netral*

X_1 = reaktansi urutan positif.



Gambar 2.1 Hubung Singkat Tiga Fasa

Keterangan :

➡ : Arah arus hubung singkat

↔ : Arah arus kontribusi hubung singkat

2.2.2 Hubung Singkat Antar Fasa

Ketika antar dua fasa terhubung menjadi satu titik terjadi hubung singkat, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$I_{sc} 2\phi = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} \quad (2.2)$$

Keterangan :

V_{LL} = tegangan *line to line*

X_2 = reaktansi urutan negatif.

Jika X_1 sama dengan X_2 maka :

$$I_{sc} 2\phi = \frac{V_{LL}}{2X_1} \quad (2.3)$$

karena :

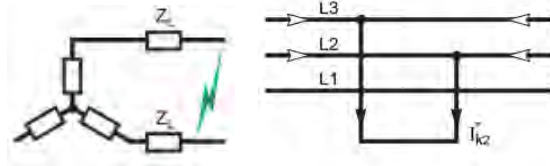
$$V_{LL} = \sqrt{3} V_{LN} \quad (2.4)$$

Sehingga :

$$I_{sc} 2\phi = \frac{\sqrt{3} V_{LN}}{2X_1} \quad (2.5)$$

apabila mengacu pada persamaan (2.1), maka :

$$I_{sc} 2\phi = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc} 3\phi$$



Gambar 2.2 Hubung Singkat Antar Fasa

Keterangan :

➡ : Arah arus hubung singkat

↔ : Arah arus kontribusi hubung singkat

2.2.3 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Ketika hubung singkat salah satu fasa terhubung dengan tanah atau disebut dengan *ground fault*, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

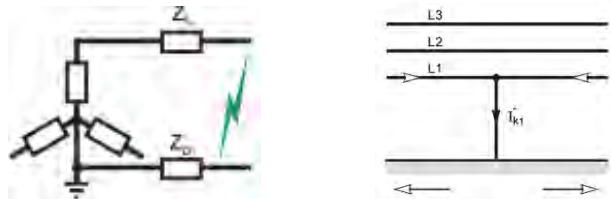
$$I_{sc} 1\phi = \frac{3 \times V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0 + Z_G} \quad (2.7)$$

Z_G = impedansi ke tanah.

Apabila Z_G minimum atau mendekati nol, dan X_1 sama dengan X_2 dan X_0 , maka :

$$I_{sc} 1\phi = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (2.8)$$

$$= I_{sc} 3\phi \quad (2.9)$$



Gambar 2.3 Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Keterangan :

➡ : Arah arus hubung singkat

↔ : Arah arus kontribusi hubung singkat

2.3 Rele Arus Lebih (*Overcurrent Relay*)

Rele arus lebih bekerja ketika arus yang mengalir melebihi batas yang ditentukan. Prinsip kerja dari rele arus lebih adalah sebagai berikut:

Jika $I_f > I_p$ rele bekerja (*trip*)
Jika $I_f < I_p$ rele tidak bekerja (blok)

I_f = arus gangguan yang di mengalir pada trafo arus (CT)

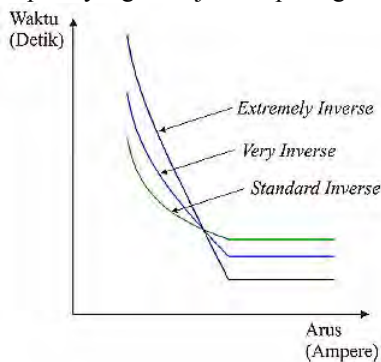
I_p = arus *pickup*.

Rele arus lebih terdiri dari rele arus lebih waktu *invers* dan rele arus lebih waktu instan.

2.3.1 Rele Arus Lebih Waktu Invers (*Inverse*)

Rele arus lebih waktu invers berkerja dengan waktu operasi yang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Artinya, semakin besar arus gangguan yang terjadi maka semakin cepat rele beroperasi, dan juga sebaliknya semakin kecil arus gangguan yang terjadi maka semakin lama rele beroperasi. Prinsip kerja ini juga dapat dilihat pada kurva TCC (*Time-Current Characteristic*). TCC adalah kurva dalam skala *time dial*, dimana semakin besar *time dial* maka semakin lama rele beroperasi.

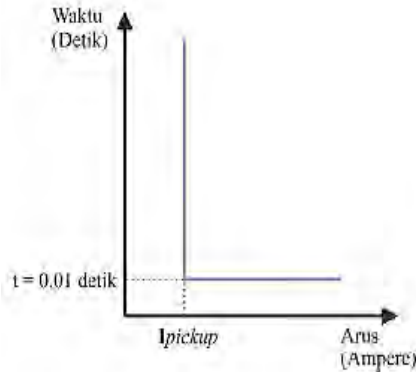
Berikut ini adalah jenis proteksi waktu invers yang memiliki perbedaan gradien kurvanya yaitu *very inverse*, *standard inverse*, dan *extremely inverse* seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut



Gambar 2.4 Karakteristik Kurva Very Inverse, Standard Inverse dan Extremely Inverse

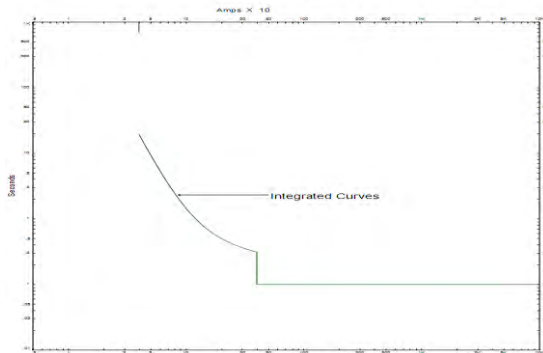
2.3.2 Rele Arus Lebih Waktu Instan (*Instanteous*)

Rele arus lebih waktu instan bekerja tanpa adanya *delay* atau penundaan waktu yang pada umumnya kurang dari 0.08 detik. Ketika terjadi arus gangguan hubung singkat yang ditentukan terjadi, rele akan bekerja berdasarkan arus tersebut dan membuka pemutus dalam waktu yang cepat yaitu 0.08 detik. Karakteristik rele arus lebih waktu *instan* dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan

Saat ini penggunaan rele memiliki kurva *invers* dan *instan*, sehingga kurva karakteristiknya merupakan gabungan dari kurva *instan* dan *invers*. Karakteristik kurva integrasi dari rele arus waktu invers dan instan dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Karakteristik Kurva Integrasi Rele Arus Lebih Waktu Invers dan Instan

2.4 Setting Rele Arus Lebih

Setting rele arus lebih dibedakan menjadi dua, yaitu *setting* rele arus waktu *invers* dan *setting* rele arus waktu instan.

2.4.1 Setting Rele Arus Waktu Invers

Setting rele arus waktu invers memiliki dua parameter yang harus diatur, yaitu arus *pickup* dan *time dial*. Arus *pickup* merupakan nilai arus minimum yang diatur agar rele pengaman bekerja. Besarnya arus *pickup* ini ditentukan dengan pemilihan *tap*. Adapun besarnya *tap* yang digunakan berdasarkan persamaan berikut :

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} \quad (2.10)$$

Iset = arus *pickup* dalam ampere.

Sedangkan batas penentuan arus *pickup* untuk perlindungan beban lebih pada rele menurut British Standard BS 142 adalah :

$$1,05 \text{ FLA} < I_{set} < 1,4 \text{ FLA} \quad (2.11)$$

Dimana FLA (*full load ampere*) = arus beban penuh peralatan.

Kemudian dilakukan *setting* pada *time dial*, dimana *setting* ini menentukan waktu operasi. Penentuan *time dial* dari masing – masing kurva karakteristik invers dari rele arus lebih dapat digunakan persamaan berikut:

$$td = \frac{k \times T}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{\alpha} - 1 \right]} \quad (2.12)$$

Keterangan :

td = waktu operasi (detik)

T = time dial

I = nilai arus (Ampere)

Iset = arus *pickup* (Ampere)

k = koefisien invers 1 (lihat Tabel 2.1)

α = koefisien invers 2 (lihat Tabel 2.1)

β = koefisien invers 3 (lihat Tabel 2.1)

Tabel 2.1 Koefisien Invers Time Dial

Tipe Kurva	Koefisien		
	K	α	β
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,970
<i>Very Inverse</i>	13,50	1,00	1,500
<i>Extremely Inverse</i>	80,00	2,00	0,808

2.4.2 Setting Rele Arus Lebih Instan

Rele arus lebih instan bekerja ketika ada arus melebihi dari arus *pickup* secara seketika sesuai dengan waktu tundanya (*time delay*). Parameter yang diatur pada rele arus lebih waktu instan ini ada dua, yaitu *setting pickup* dan *time delay*. Penentuan *setting pickup* dipengaruhi oleh besar $I_{sc \min}$ yang dituliskan pada persamaan berikut ini :

$$I_{set} \leq 0.8 I_{sc \min} \quad (2.14)$$

$I_{sc \min}$ = arus gangguan dua fasa pada 30 *cycle* yang melewati rele.

Namun pada kondisi khusus dimana pada suatu pengaman *feeder* dibapisahkan oleh suatu trafo, maka *setting* untuk rele waktu instan adalah sebagai berikut :

$$I_{sc \max \text{ sekunder}} \leq I_{set} \leq 0.8 I_{sc \min \text{ primer}} \quad (2.15)$$

$I_{sc \max \text{ sekunder}}$ = arus gangguan tiga fasa pada sisi sekunder trafo

$I_{sc \min \text{ primer}}$ = arus gangguan dua fasa pada sisi primer trafo.

2.5 Koordinasi Proteksi Berdasarkan Arus dan Waktu

Rele pengaman pada suatu sistem kelistrikan harus terkoordinasi dengan baik. Artinya, saat terjadi gangguan pada sistem kelistrikan rele utama dan rele *backup* tidak boleh bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, harus ada perbedaan waktu operasi antara rele utama dan rele *backup*. Perbedaan waktu operasi antar rele ini sering disebut dengan istilah *grading time* (Δt). Perbedaan waktu kerja antara rele utama dan rele *backup* adalah 0,2 – 0,3 detik. Dengan spesifikasi berikut menurut standard IEEE 242 :

Waktu buka CB : 0.04 – 0.1 s (2-5 *cycle*)

Overtravel dari rele: 0.1 s

Faktor keamanan : 0.12-0.22 s

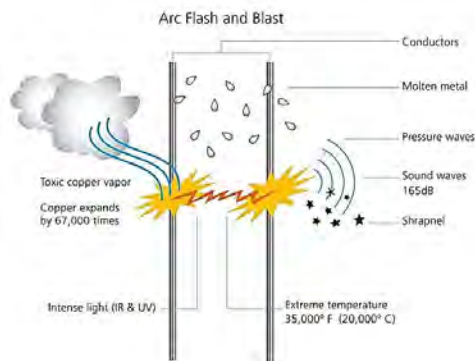
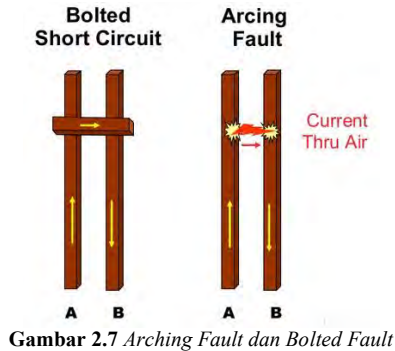
Untuk rele berbasis *microprocessor* *Overtravel time* dari rele diabaikan. Sehingga total waktu yang diperlukan adalah 0.2-0.4 s.

2.6 Busur Api (*Arc Flash*)

Busur Api (*arc flash*) ialah pelepasan energi panas yang sangat tinggi akibat adanya arcing fault atau bolted fault. Arc fault merupakan arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor dengan konduktor atau konduktor dengan tanah (*arcing fault current*). Sedangkan

bolted fault menggunakan perantara konduktor sebagai jalur arus gangguannya.

Arc fault umumnya terjadi pada tegangan lebih dari 120 volt, dan menyebabkan udara sebagai konduktornya. Besar *arc fault current* lebih rendah dari besar *bolted fault* dan dibawah *rating circuit breaker*. *Arcing fault current* dapat menciptakan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya. Efek yang dihasilkan *arc fault* dapat berupa radiasi panas dengan temperatur mencapai 35.000o F atau sekitar 4 kali panas permukaan matahari. *Bolted fault current* dapat disebabkan oleh kesalahan pekerja, kegagalan isolasi, kegagalan mekanik, debu, dan korosi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar dibawah ini



Jumlah energi yang dihasilkan *arc flash* dipengaruhi oleh arus hubung singkat maksimum, level tegangan pada titik gangguan, waktu yang dibutuhkan peralatan pengaman untuk menghilangkan gangguan, jarak antar konduktor, dan jarak pekerja dengan titik *arcing*.

2.6.1 Perhitungan Energi Busur Api Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002.

Untuk menghitung *arc flash* menggunakan standart IEEE 1584-2002, yang pertama harus dihitung adalah mencari nilai dari arus *arcing fault*. Terdapat dua persamaan untuk menghitung arus *arcing fault*, bergantung pada besarnya level tegangan bus

Untuk level tegangan bus kurang dari atau sama dengan 1kV, persamaan arus dapat diperoleh dengan rumus :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \quad (2.9)$$

Untuk level tegangan 1kV – 15kV digunakan persamaan :

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (2.10)$$

Keterangan :

\lg = \log_{10}

I_a = arus *arcing* (kA)

K = -0,153 untuk konfigurasi terbuka dan -0,097 untuk konfigurasi box

I_{bf} = *bolted fault current* pada gangguan tiga fasa (simetris RMS) (kA)

V = tegangan sistem (kV)

G = celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai *arcing current* didapatkan, maka nilai *incident energy* dapat dihitung. Dalam perhitungan besar energi yang normal, menggunakan referensi waktu arcing dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik arcing ke manusia sebesar 610 mm. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \quad (2.11)$$

Keterangan :

E_n = incident energy normalized (J/cm²)

K_1 = -0,792 untuk konfigurasi terbuka (no enclosure); -0,555 untuk konfigurasi box (enclosed equipment)

- K_2 = 0 untuk sistem ungrounded and high-resistance grounded;
 0,113 untuk sistem grounded
 G = jarak/celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai E_n didapatkan, dapat dihitung besar insiden energi E digunakan persamaan :

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.12)$$

Keterangan :

- E = incident energy (J/cm²)
 C_f = faktor pengali 1,0 untuk tegangan diatas 1kV, dan 1,5 untuk tegangan dibawah 1kV
 E_n = incident energy normalized
 t = waktu arcing (detik)
 D = jarak dari titik *arc* ke pekerja (mm)
 x = jarak *exponent*

Dalam perhitungan nilai *arcing fault* dan *incident energy* perlu diperhatikan mengenai tipikal gap antar bus, tipikal jarak kerja, faktor peralatan pada tiap level tegangan sesuai dengan standart IEEE 1584-2002. Tipikal gap, jarak kerja dan faktor peralatan dapat dilihat pada Tabel 2.1, Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.2 Tipikal Gap Antar Bus

Kelas Peralatan	Tipikal Gap Antar Bus
15 kV <i>Switchgear</i>	152
5 kV <i>Switchgear</i>	104
<i>Low- voltage Switchgear</i>	32
<i>Low- voltage MCC dan Panelboards</i>	25
Kabel	13
Lainnya	Tidak Tersedia

Tabel 2.3 Tipikal Jarak Kerja

Kelas Peralatan	Tipikal Jarak Kerja
15 kV <i>Switchgear</i>	910
5 kV <i>Switchgear</i>	910
<i>Low- voltage Switchgear</i>	610

Tabel 2.4 Tipikal Jarak Kerja (Lanjutan)

<i>Low-voltage</i> MCC dan <i>Panelboards</i>	455
Kabel	455
Lainnya	Ditentukan di Tempat

Tabel 2. 5 Faktor Peralatan dan Kelas Tegangan

Tegangan Sistem (kV)	Kelas Peralatan	Tipikal Gap Antar Bus (mm)	Jarak Faktor X
0,208-1	<i>Open Air</i>	10-40	2,000
	<i>Switchgear</i>	32	1,473
	MCC dan <i>Panels</i>	25	1,641
	Kabel	13	2,000
> 1-5	<i>Open Air</i>	13-102	2,000
	<i>Switchgear</i>	13-102	0,973
	Kabel	13	2,000
>5-15	<i>Open Air</i>	13-153	2,000
	<i>Switchgear</i>	153	0,973
	Kabel	13	2,000

2.6.2 *Lee Method*

Untuk perhitungan *incident energy* yang memiliki tegangan lebih dari 15kV atau gap yang lebih dari *range*, dapat menggunakan teori *Lee Method* yang termasuk dalam IEEE Std. 1584-2002. Persamaan *Lee Method* sebagai berikut:

$$E = 2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana:

E = *incident energy* (J/cm²)

V = tegangan sistem (kV)

t = waktu arcing (detik)

D = jarak dari titik *arc* ke pekerja (mm)

I_{bf} = *bolted fault current* pada gangguan tiga fasa (simetris RMS) (kA)

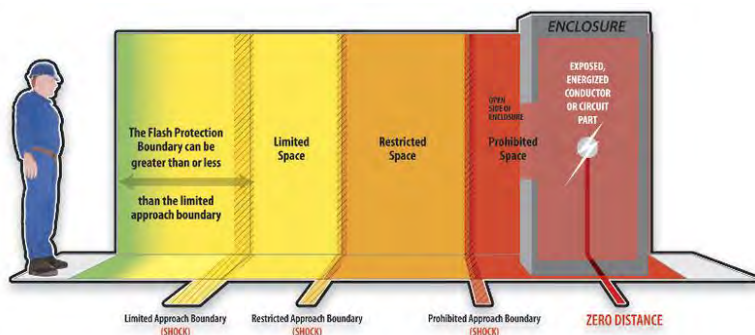
2.6.3 *Flash Protection Boundary*

Flash protection boundary adalah batas jarak untuk orang dari bagian konduktif aktif dimana jika terjadi ledakan busur api listrik, maka orang pada jarak tersebut dapat terpapar luka bakar tingkat dua. Dari

pendekatan tersebut *National Fire Protection Association* (NFPA) telah menetapkan 4 batasan perlindungan, yaitu:

1. *Flash Protection Boundary*
Ketika busur api terjadi, seorang pekerja yang berada pada batasan ini masih dapat terkena dampak luka bakar tingkat kedua jika dia tidak menggunakan alat perlindungan diri ketika tingkat insiden energinya 5 J/cm^2 ($1,2 \text{ cal/cm}^2$).
2. *Limited Approach Boundary*
Batas pendekatan jarak dari bagian konduktor listrik yang bertegangan atau bagian rangkaian dimana terdapat bahaya sengatan listrik.
3. *Restricted Approach Boundary*
Batas pendekatan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana ada peningkatan resiko terkena *shock* karena busur api, dikombinasikan dengan gerakan yang tidak disengaja oleh pekerja.
4. *Prohibited Approach Boundary*
Batas pendekatan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana pekerja dianggap melakukan kontak langsung dengan konduktor listrik bertegangan.

Untuk lebih jelasnya mengenai batasan *flash protection boundary* dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2.9 Batas Pendekatan Jarak Flash Protection Boundary

2.6.4 Perhitungan Flash Protection Boundary

Untuk menentukan batas pendekatan jarak *flash protection boundary* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sesuai standar IEEE 1584-2002 sebagai berikut [12]:

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.14)$$

Untuk *Lee Method* sebagai berikut :

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (2.15)$$

Dimana :

D_B = jarak batasan dari titik *arcing* (mm)

C_f = factor pengali : 1,0 untuk tegangan diatas 1 kV
1,5 untuk tegangan dibawah 1 kV

E_n = *incident energy normalized*

t = waktu (detik)

x = jarak *exponent*

E_B = insiden energy dalam J/cm^2 pada jarak batasan. Dapat diset pada nilai 5,0 J/cm^2

2.6.5 Pengelompokan Tingkatan Energi Busur Api Sesuai dengan *Personal Protective Equipment (PPE)*

Berdasarkan standar NFPA 70E dengan memperhatikan kategori bahaya atau resiko busur api, maka *personal protective equipment* (PPE) dikategorikan berdasarkan besar insiden energi pada busur api. Pengelompokan kategori bahaya busur api dapat dilihat pada Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.6 Pengelompokan Kategori Bahaya Busur Api Berdasarkan NFPA 70E

Kategori	Level Energi (Cal/cm ²)	<i>Personal Protective Equipment</i> (PPE)
0	0 – 1,2	Pelindung mata Pelindung telinga Sepatu <i>safety leather</i> Kemeja lengan panjang Celana panjang
1	1,2 – 4	Pakaian tahan api Pelindung kepala Pelindung mata Sepatu <i>safety leather</i> Pelindung telinga Celana panjang

Tabel 2.5 Pengelompokan Kategori Bahaya Busur Api Berdasarkan NFPA 70E (Lanjutan)

2	4 – 8	Pelindung wajah dan kepala Pakaian tahan api Sarung tangan <i>leather</i> Sepatu <i>safety leather</i> Pelindung mata Pelindung telinga Celana panjang
3	8 – 25	<i>Flash suit hood</i> Pelindung wajah dan kepala Sarung tangan <i>leather</i> Sepatu <i>safety leather</i> Pakaian tahan api Pelindung mata Pelindung telinga Celana panjang
4	25 – 40	<i>Up to 40 cal/cm² Flash suit hood</i> Pelindung wajah dan kepala Sarung tangan <i>leather</i> Sepatu <i>safety leather</i> Pakaian tahan api Pelindung mata Pelindung telinga Celana panjang

Untuk lebih jelasnya mengenai alat pelindung diri/personal protective equipment (PPE) dapat dilihat pada Gambar 2.10



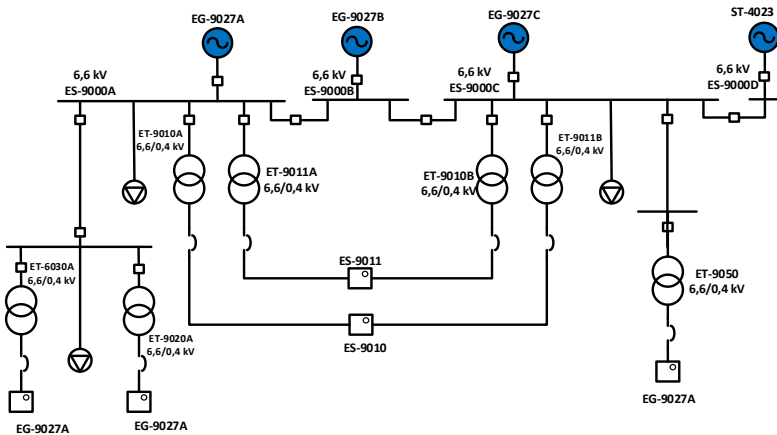
Gambar 2.10 Personal Protective Equipment (PPE) (level 0,1,2,3,4)(dari kiri ke kanan)

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT PERTAMINA JOB MEDCO ENERGI TOMORI FIELD SENORO

3.1 Sistem Kelistrikan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro menggunakan 4 unit generator dengan kapasitas $3 \times 3,8$ MW dan $1 \times 5,33$ MW sebagai syarat untuk memenuhi suplai daya yg dibutuhkan beban nya. Pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro menggunakan sistem radial dengan tegangan menengah 6,6 kV serta tegangan rendah 0,4 Kv Adapun single line diagram sistem kelistrikan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Single Line Diagram PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

3.2 Kapasitas Pembangkitan

Dalam proses pembangkitan listrik di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro menggunakan pembangkit utama sebanyak 4 unit generator yang bertujuan untuk memenuhi suplai daya ke beban. Untuk lebih lengkapnya mengenai kapasitas pembangkitan dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkit PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

No.	ID	MW	MVA	kV	PF
1	EG-9027A	3,8	4,75	6,6	80
2	EG-9027B	3,8	4,75	6,6	80
3	EG-9027C	3,8	4,75	6,6	80
4	ST-4023	5,33	6,662	6,6	80

3.3 Sistem Distribusi di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro pada sistem distribusinya menggunakan sistem radial dengan tegangan menengah 6,6 kV serta tegangan rendah 0,4 kV yang terhubung langsung dengan beban motor.

Tabel 3.2 Data Level Tegangan Bus di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

No.	ID	Tegangan (kV)
1	ES-9000A	6,6
2	ES-9000B	6,6
3	ES-9000C	6,6
4	ES-9000D	6,6
5	ES-9001	6,6
6	ES-6030	0,4
7	ES-9020	0,4
8	ES-9011A	0,4
9	ES-9011B	0,4
10	ES-9010A	0,4
11	ES-9010B	0,4
12	ES-9050	0,4

PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro pada saat kondisi normal memiliki total pembangkitan, pembebanan, dan rugi – rugi yang dirangkum sebagai berikut:

Tabel 3.3 Data Rangkuman Pembangkitan dan Pembebanan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

Type	MW	MVAR
Generation	11,942	7,633
Load	11,663	7,465
Loss	0,279	0,168

Beban pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro diklasifikasikan menjadi dua level tegangan yaitu pada bus level tegangan 6,6 kV yang digunakan untuk mensuplai beban kapasitas besar sedangkan pada bus level tegangan 0,4 kV digunakan untuk mensuplai beban kapasitas kecil. Beban dengan dengan level tegangan 0,4 kV pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro disuplai melalui bus dengan level tegangan 6,6 kV kemudian diturunkan melalui trafo daya. Rincian trafo yang mensuplai beban dengan level tegangan 0,4 kV tertera pada tabel 3.4

Tabel 3.4 Data transformator sistem distribusi PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

No	ID	Kapasitas (kVA)	Tegangan (kV)	%Z	Hubungan
1	ET-6030	100	6,6/0,4	4	Delta-Wye
2	ET-9020	400	6,6/0,4	4	Delta-Wye
3	ET-9011A	3000	6,6/0,4	7	Delta-Wye
4	ET-9011B	3000	6,6/0,4	7	Delta-Wye
5	ET-9010A	3500	6,6/0,4	7	Delta-Wye
6	ET-9010B	3500	6,6/0,4	7	Delta-Wye
7	ET-9050	1000	6,6/0,4	5	Delta-Wye

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL SIMULASI DAN ANALISA

4.1 Sistem Kelistrikan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

Dalam memodelkan sistem kelistrikan PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro dilakukan dengan cara menggambarkan *single line diagram* menggunakan *software*. Pemodelan simulasi sistem kelistrikan ini memerlukan data – data pada tiap peralatan seerti yang di jelaskan pada bab sebelumnya.

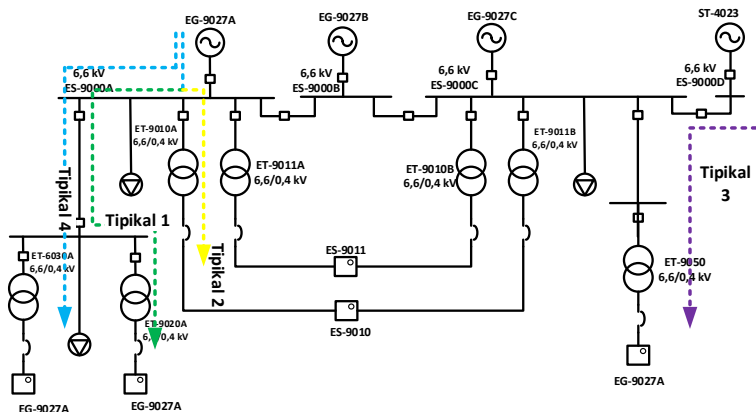
Setelah dilakukan pemodelan pada *software* selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya untuk memastikan apakah sistem dalam keadaan stabil dan berjalan dengan baik. Dengan analisa aliran daya ini bisa diketahui tegangan pada bus, pembebanan pada tiap trafo dan juga rugi – rugi daya listrik. Selanjutnya dilakukan simulasi hubung singkat untuk mengetahui besar arus hubung singkat ketika terjadi gangguan sebagai pertimbangan untuk melakukan penyetelan proteksi. Sehingga *setting* koordinasi proteksi yang dilakukan tepat dan handal.

4.2 Tipikal Koordinasi Proteksi PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro

Pemilihan tipikal dalam koordinasi proteksi dilakukan dengan tujuan mempermudah melakukan *setting* proteksi. Pemilihan tipikal harus mewakili sistem secara keseluruhan. Untuk koordinasi proteksi PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro dipilih enam tipikal. Tipikal ini terdiri dari :

- 1) Koordinasi rele pengaman arus lebih fasa dari sekunder trafo ET-9020 hingga generator EG-9027. Rele yang dikoordinasikan adalah rele R-rele ET-9020-S, rele R-ET9020, rele R-ES9001 dan rele R-EG9027A
- 2) Koordinasi rele pengaman arus lebih dari sekunder trafo ET-9010 hingga generator EG-9027. Rele yang dikoordinasikan adalah rele R-ET9010A-S, rele R-ET9010A dan rele R-EG9027A.
- 3) Koordinasi rele pengaman arus lebih fasa dari sekunder trafo ET-9050 hingga generator ST-4023. Rele R-ET9050-S, rele R-ET9050 dan rele R-ST4023.
- 4) Koordinasi rele pengaman arus lebih ke tanah dari beban motor hingga generator EG-9027.

Untuk membantu pemahaman, tipikal – tipikal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini :



Gambar 4.1 Pemodelan masing - masing tipikal

4.3 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat

Analisis arus gangguan hubung singkat dilakukan untuk mendapatkan nilai besar arus saat terjadi gangguan sebagai pertimbangan ketika melakukan *setting* rele pada proteksi. Analisis ini dilakukan di tiap bus pada tipikal yang telah disebutkan sebelumnya. Terdapat dua parameter arus hubung singkat yang digunakan yaitu arus hubung singkat maksimum dan hubung singkat minimum. Arus hubung singkat maksimum terjadi ketika gangguan tiga fasa pada saat $\frac{1}{2}$ cycle. Sedangkan arus hubung singkat minimum terjadi ketika gangguan dua fasa pada saat 30 cycle.

4.3.1 Hubung Singkat Minimum

Arus hubung singkat minimum terjadi ketika gangguan dua fasa pada saat 30 cycle. Nilai arus hubung singkat ini digunakan sebagai batasan maksimum pada *setting* rele arus lebih waktu instan. Sehingga jika terjadi gangguan minimum, maka rele bekerja pada waktu instan sesuai dengan *setting* waktu delainya. Begitupun juga ketika terjadi gangguan maksimum, rele akan bekerja pada waktu instan sesuai dengan *setting* waktu delainya. Analisis hubung singkat ini dilakukan pada bus tertentu yang terlihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Data Arus Hubung Singkat Minimum

Bus		Arus Hubung Singkat Minimum (kA)
ID	kV	
B-ET9010AP	6,6	12,87
B-ET9020P	6,6	2,74
B-ET9020S	0,4	10,72
B-ET9050P	6,6	11,29
Bus894	0,4	56,7
Bus903	0,4	23,46
ES-9000A	6,6	13,13
ES-9000D	6,6	13,13
ES-9001	6,6	2,84

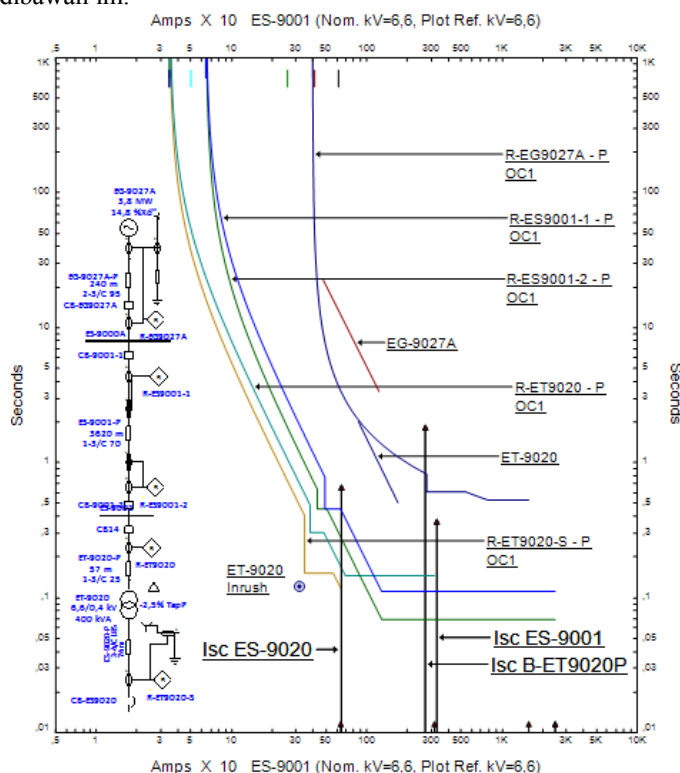
4.3.2 Hubung Singkat Maksimum

Arus hubung singkat maksimum terjadi ketika gangguan tiga fasa pada saat $1/2$ cycle. Nilai arus hubung singkat ini digunakan sebagai pertimbangan pada *setting* rele diferensial. Untuk kasus tertentu, nilai arus hubung singkat ini juga digunakan sebagai batasan minimum pada *setting* rele arus lebih waktu instan. Analisis hubung singkat ini dilakukan pada bus tertentu yang terlihat pada tabel 4.2 dibawah ini :

Tabel 4.2 Data Arus Hubung Singkat Maksimum

Bus		Arus Hubung Singkat Maksimum (kA)
ID	kV	
B-ET9010AP	6,6	16,17
B-ET9020P	6,6	3,21
B-ET9020S	0,4	12,47
B-ET9050P	6,6	13,94
Bus894	0,4	68,04
Bus903	0,4	27,35
ES-9000A	6,6	16,52
ES-9000D	6,6	16,52
ES-9001	6,6	3,33

Characteristic). Hasil simulasi pada rele eksisting terlihat pada gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.3 Plot kurva rele pengaman eksisting tipikal 1

Selanjutnya untuk mengetahui urutan dan waktu kerja dari masing - masing rele dapat dilihat dengan cara *sequence viewer* yang ditunjukkan pada gambar 4.4.

Time (ms)	ID	If (kA)	Condition
117	R-ET9020-S	10,681	Phase - OC1 - 51
125	CB-ES9020		Tripped by R-ET9020-S Phase - OC1 - 51
161	R-ET9020	0,664	Phase - OC1 - 51
171	CB14		Tripped by R-ET9020 Phase - OC1 - 51
311	R-ES9001-2	0,614	Phase - OC1 - 51
321	CB-9001-2		Tripped by R-ES9001-2 Phase - OC1 - 51

Gambar 4.4 Urutan Dan Waktu Kerja Rele Eksisting Tipikal 1

Dari gambar 4.3 terlihat bahwa antara rele utama dan rele *backup* bekerja dengan *grading time* $161 - 117 = 44 \text{ ms}$ atau $0,044 \text{ s}$ yang disebabkan oleh *setting time dial*-nya terlalu rendah sehingga mengenai kurva *invers* dari rele. Hal ini memungkinkan kedua rele tersebut bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, perlu dilakukan *resetting* pada tipikal ini.

Resetting pada tipikal ini dapat dilakukan dengan perhitungan secara manual. Perhitungannya dijabarkan sebagai berikut :

Rele R-ET9020-S

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 80
Curve Type : IEC *Standard Invers*
FLA : 577,4 A
CT Ratio : 800 / 5
Isc min ES-9020 : 10,63 kA
Isc max ES-9020 : 12,320 kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$
 $1,05 \times 577,4 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 577,4$
 $606,27 < I_{\text{set}} < 808,36$
 Dipilih $I_{\text{set}} = 608 \text{ A}$

$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{608}{800} = 0,76$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,3 s

$$t_d = \frac{0,14 \times TDS}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = \frac{0,3 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{12320}{608} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = 0,395$$

Maka, dipilih TDS sebesar 0,4

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ Beban} < I_{set} < 0,8 \times I_{sc} \text{ min}$$

$$1,6 \times 577,4 < I_{set} < 0,8 \times 10630$$

$$923,84 < I_{set} < 8504$$

Dipilih $I_{set} = 5600$

$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{1600}{800} = 2$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,3 detik

Rele R-ET9020 P

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam 40

Curve Type : IEC *Standard Invers*

FLA : 34,99 A

CT Ratio : 50 / 5

Isc min B-ET9020P: 2,73 kA

Isc max B-ET9020S: 3,2 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 34,99 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 34,99$$

$$36,74 < I_{\text{set}} < 48,99$$

$$\text{Dipilih } I_{\text{set}} = 45 \text{ A}$$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{45}{50} = 0,9$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,1 s

$$t_d = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS} = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TDS} = \frac{0,1 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{3200}{45} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TDS} = 0,189$$

Maka, dipilih TDS sebesar 0,6

Instantaneous Pickup

$$I_{\text{sc max bus sekunder}} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$12320 \times \left(\frac{0,4}{6,6} \right) < I_{\text{set}} < 0,8 \times 2730$$

$$746,7 < I_{\text{set}} < 2184$$

$$\text{Dipilih } I_{\text{set}} = 800$$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{800}{50} = 16$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,1 detik

Rele R-ES9001

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam 40

Curve Type : IEC Standard Invers

FLA : 95,578 A

CT Ratio : 150 / 5

Isc min ES-9001 : 2,65 kA

Isc max ES-9001 : 3,07 kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$

$1,05 \times 95.578 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 95.578$

$100.356 < I_{\text{set}} < 133,81$

Dipilih $I_{\text{set}} = 100,5 \text{ A}$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{100,5}{150} = 0,67$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,3 s

$$t_d = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS} = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TDS} = \frac{0,3 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{3070}{100,5} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

TDS = 0,450

Maka, dipilih TDS sebesar 0,59

Instantaneous Pickup

$1,6 \times \text{FLA Beban} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc min}$

$1,6 \times 95.578 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 2650$

$152.92 < I_{\text{set}} < 2120$

Dipilih $I_{\text{set}} = 1050$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{1050}{150} = 7$$

Time delay

dipilih time delay = 0,3 detik

Rele R-EG9027A

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 80
Curve Type : IEC *Standard Invers*
FLA : 415,5 A
CT Ratio : 600 / 5
Isc min ES-9000A : 2,3 kA
Isc max ES-9000A : 3,03 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 415,5 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 415,5$$

$$436,28 < I_{\text{set}} < 664,80$$

Dipilih $I_{\text{set}} = 450 \text{ A}$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{450}{600} = 0,75$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,3 s

$$t_d = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

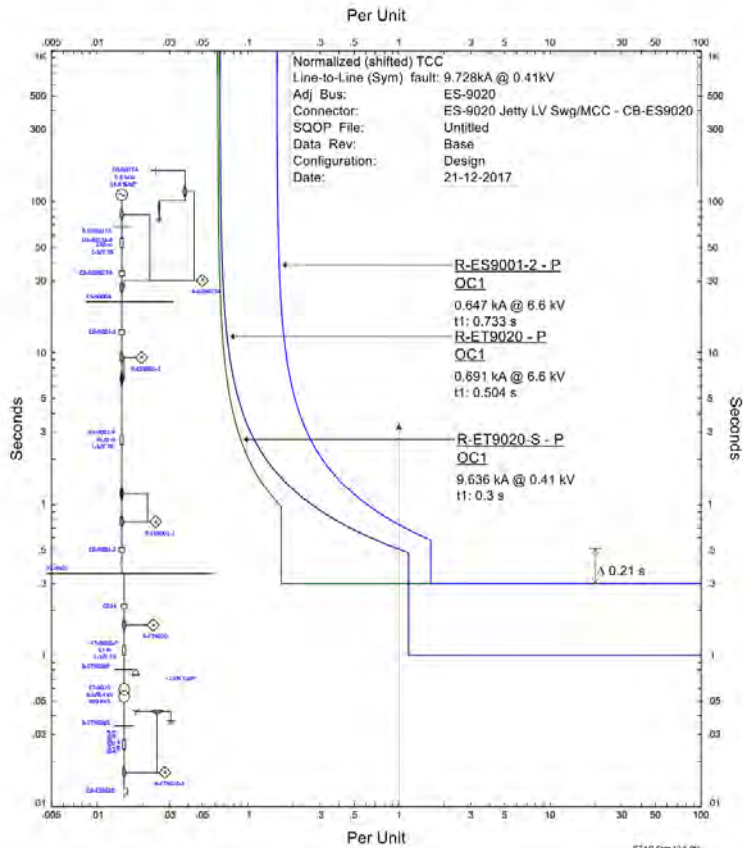
$$\text{TDS} = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TDS} = \frac{0,3 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{3030}{450} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TDS} = 0,412$$

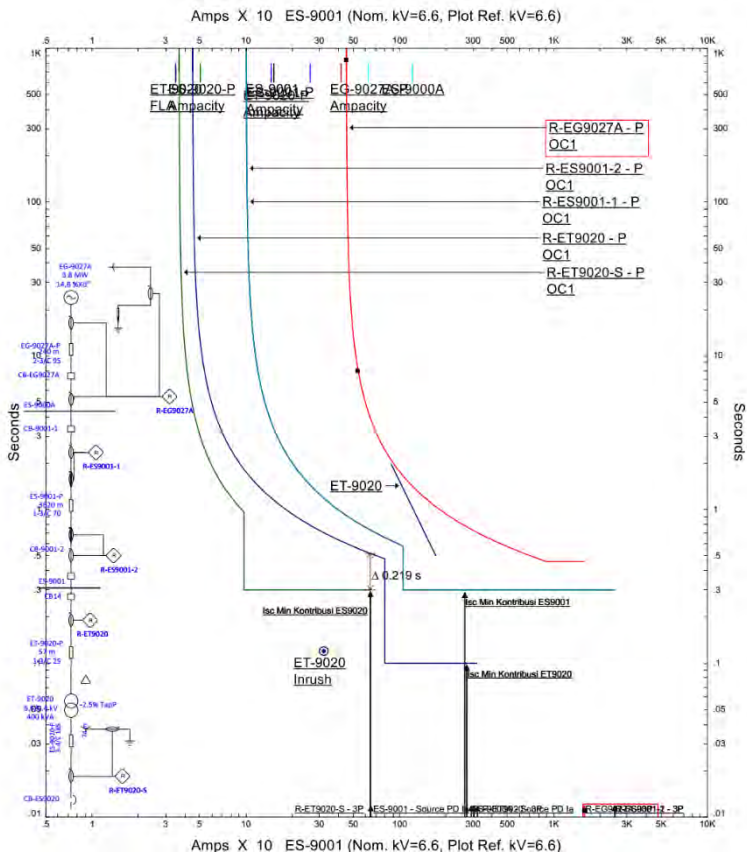
Maka, dipilih TDS sebesar 0,66

Setelah dilakukan perhitungan manual divisualisasi berupa plot dalam bentuk kurva hasil koordinasi proteksi berupa gambar. Berikut merupakan hasil plot kurva koordinasi proteksi pada tipikal 1 yang disajikan pada gambar 4.5. dan ditunjukkan plot kurva koordinasi pengaman pada tipikal 1 setelah dilakukan *resetting*.



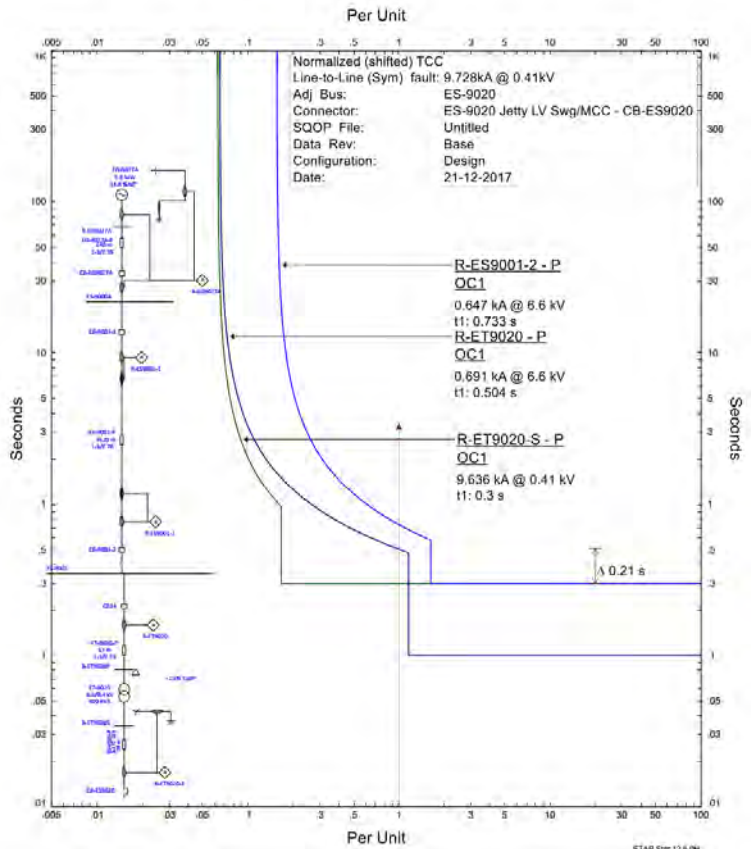
Gambar 4.5 Plot Kurva Rele Pengaman Existing Tipikal 1

Pada Gambar 4.5 dapat diamati bahwa terdapat kurva yang saling berimpitan, hal ini kurang dianjurkan karena dapat mengakibatkan salah koordinasi proteksi.



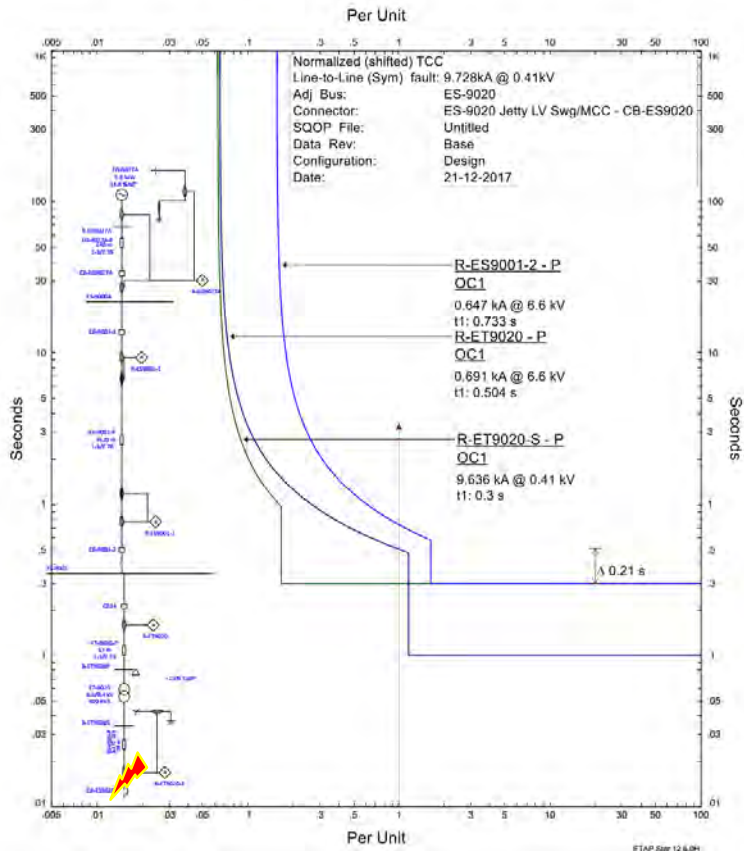
Gambar 4.6 Plot Kurva Rele Pengaman Resetting Tipikal 1

Pada Gambar 4.6 merupakan hasil *resetting* dari tipikal 1.



Gambar 4.7 Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 1 ketika gangguan pada bus ES-9020

Selanjutnya disimulasikan dengan memberi gangguan sebagai perbandingan antara *eksisting* dan *resetting*. Gambar TCC pada kondisi *resetting* ketika terjadi gangguan dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.8 Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 1 ketika gangguan pada bus ES-9020

Untuk melihat waktu dan urutan kerja rele dapat dilihat pada *sequence viewer* yang terdapat pada gambar 4.8 dibawah ini.

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

Line-to-Line (Symmetrical) fault on connector between ES-9020 Jetty LV Swg/MCC & CB-ES9020.
Adjacent bus: ES-9020

Data Rev.: Base Config: Design Date: 21-12-2017

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	Condition
300	R-ET9020-S	9.636	300	Phase - OC1 - 50
370	CB-ES9020		70.0	Tripped by R-ET9020-S Phase - OC1 - 50
504	R-ET9020	0.691	504	Phase - OC1 - 51
574	CB14		70.0	Tripped by R-ET9020 Phase - OC1 - 51
733	R-ES9001-2	0.647	733	Phase - OC1 - 51
803	CB-9001-2		70.0	Tripped by R-ES9001-2 Phase - OC1 - 51

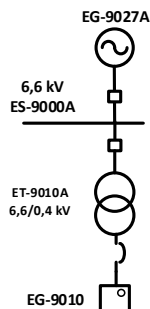
Gambar 4.9 Urutan dan waktu kerja rele resetting

Sesuai hasil perhitungan rele *resetting* pada gambar 4.5 dapat disimpulkan bahwa :

- Rele R-ET9020S berfungsi sebagai pelindung trafo terhadap gangguan arus lebih yang terjadi pada bus ES9020. *Time delay* diatur 0,3s dengan tujuan sebagai rele *backup* ketika terjadi gangguan pada beban tegangan rendah dengan cara memberi waktu tunda untuk pengaman pada beban tersebut bekerja terlebih dahulu.
- Rele R-ET9020 berfungsi sebagai pelindung bus ES-9001 ketika terjadi gangguan arus lebih. *Time delay* diatur 0,1s karena besar arus gangguan maksimum sisi sekunder trafo lebih kecil dari pada arus gangguan minimum pada sisi primer trafo.
- Rele R-ES9001 berfungsi sebagai pelindung bus ES-9000 ketika terjadi gangguan arus lebih.
- Rele R-EG9027A berfungsi sebagai pelindung generator EG-9027A ketika terjadi gangguan arus lebih.

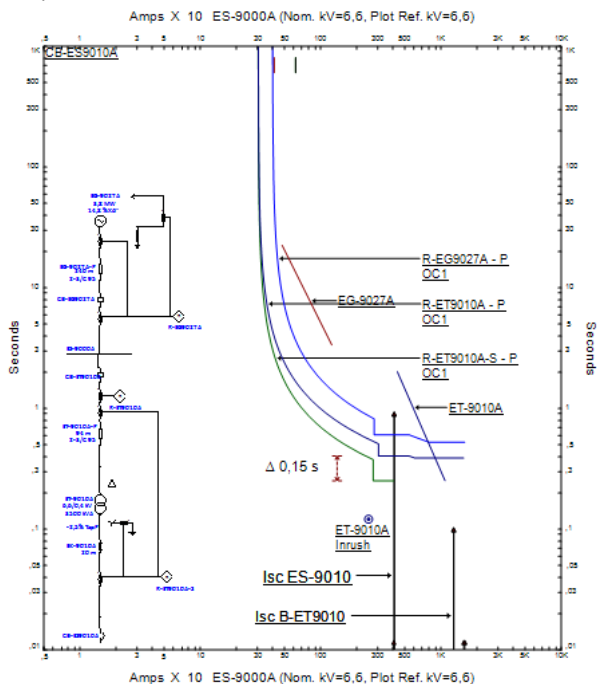
4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2

Koordinasi tipikal 2 merupakan koordinasi rele pengaman arus lebih dari beban ES-9010 LV Swg/MCC sampai dengan generator EG-9027A. Koordinasi tipikal ini dapat dilihat pada gambar 4.8 berikut ini :



Gambar 4.10 Tipikal koordinasi 2

Pada tipikal 2 ini untuk melakukan evaluasi terhadap *setting eksisting*, maka perlu dilakukan plot kurva TCC (*Time Current Characteristic*). Hasil plot pada rele eksisting terlihat pada gambar 4.11 dibawah ini.



Gambar 4.11 Plot Kurva Rele Pengaman Eksisting Tipikal 2

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa antara rele utama dan rele *backup* bekerja dengan *grading time* $400 - 250 = 150$ s atau 0,15s yang di sebabkan oleh *setting time dial*-nya terlalu rendah. Hal ini memungkinkan kedua rele tersebut bekerja secara bersamaan. Selain itu, *setting* rele R-ET9010A masih mengenai kurva karakteristik peralatan trafo. Oleh karena itu, perlu dilakukan *resetting* pada tipikal ini. *Resetting* pada tipikal ini dapat dilakukan dengan perhitungan secara manual. Perhitungannya dijabarkan sebagai berikut :

Rele R-ET9010A-S

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 80
Curve Type : IEC *Standard Invers*
 FLA : 5052 A
CT Ratio : 6000 / 5
 Isc min ES-9010 : 51,05 kA
 Isc max ES-9010: 59,17kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA < I_{set} < 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 5052 < I_{set} < 1,4 \times 5052$$

$$5304,6 < I_{set} < 7072,8$$

$$\text{Dipilih } I_{set} = 5400 \text{ A}$$

$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{5400}{6000} = 0,9$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,3 s

$$t_d = \frac{0,14 \times TDS}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = \frac{0,3 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{59170}{5400} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = 0,312$$

Maka, dipilih TDS sebesar 0,32

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Beban} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc min}$$

$$1,6 \times 577,4 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 51,05$$

$$8083,2 < I_{\text{set}} < 40840$$

Dipilih $I_{\text{set}} = 9000$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{45480}{6000} = 1,5$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,3 detik

Rele R-ET9010 A-P

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam 40

Curve Type : IEC *Standard Invers*

FLA : 306,2 A

CT Ratio : 500 / 5

Isc min B-ET9010P : 12,5 kA

Isc max B-ET9010S : 15,6 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 306,2 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 306,2$$

$$321,51 < I_{\text{set}} < 428,68$$

Dipilih $I_{\text{set}} = 400 \text{ A}$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{400}{500} = 0,8$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,1 s

$$t_d = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{2,97 \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS} = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = \frac{0,1 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{15600}{400} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = 0,161$$

Maka, dipilih TDS sebesar 0,49

Instantaneous Pickup

$$I_{sc \text{ max bus sekunder}} < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}}$$

$$59170 \times \left(\frac{0,4}{6,6} \right) < I_{set} < 0,8 \times 12500$$

$$3586,06 < I_{set} < 10000$$

Dipilih $I_{set} = 5000$

$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{5000}{500} = 10$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,1 detik

Rele R-EG9027A

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam 80

Curve Type : IEC *Standard Invers*

FLA : 415,5 A

CT Ratio : 600 / 5

Isc min ES-9000A : 2,3 kA

Isc max ES-9000A: 3,03 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA < I_{set} < 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 415,5 < I_{set} < 1,4 \times 415,5$$

$$436,28 < I_{set} < 664,80$$

Dipilih $I_{set} = 450$ A

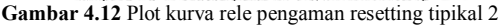
$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{450}{600} = 0,75$$

Time dial

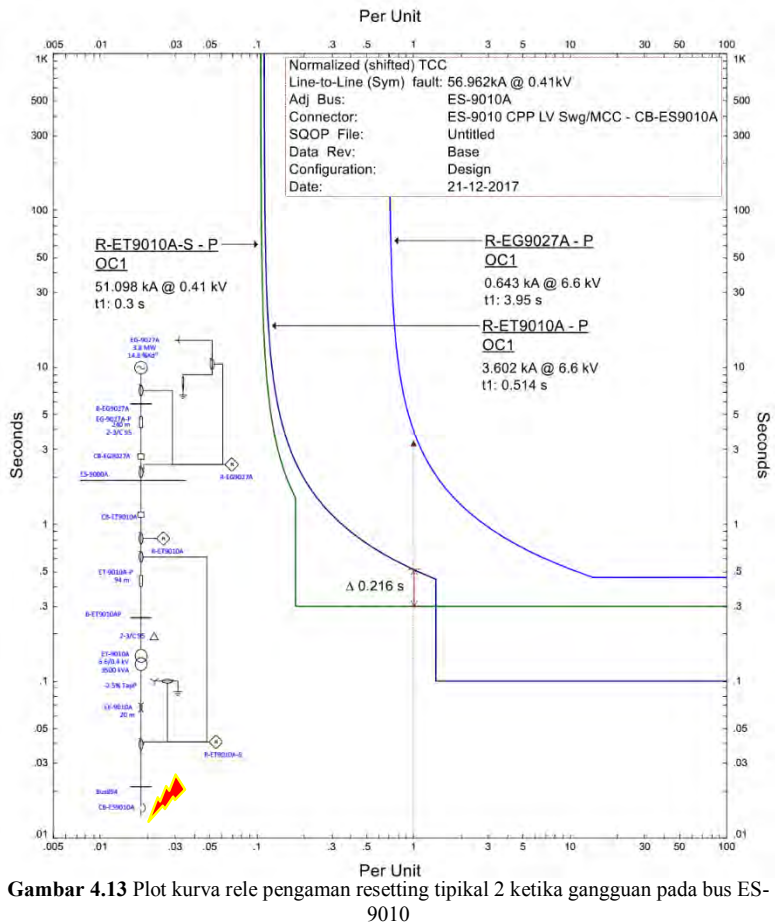
Waktu operasi minimum (t_d) = 0,3 s

Maka, dipilih TDS sebesar 0,6

Setelah dilakukan perhitungan manual, maka dilakukan pembuatan plot kurva koordinasi proteksi pada tipikal 2. Pada gambar 4.9 ditunjukkan plot kurva koordinasi pengaman pada tipikal 2 setelah dilakukan *resetting*.



Selanjutnya disimulasikan dengan memberi gangguan sebagai perbandingan antara *eksisting* dan *resetting*. Gambar TCC pada kondisi *resetting* ketika terjadi gangguan dapat dilihat pada gambar 4.11.



Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

Line-to-Line (Symmetrical) fault on connector between ES-9010 CPP LV Swg/MCC & CB-ES9010A.
Adjacent bus: ES-9010A

Data Rev.: Base Config: Design Date: 21-12-2017

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	Condition
300	R-ET9010A-S	51.098	300	Phase - OC1 - 50
370	CB-ES9010A		70.0	Tripped by R-ET9010A-S Phase - OC1 - 50
514	R-ET9010A	3.602	514	Phase - OC1 - 51
584	CB-ET9010A		70.0	Tripped by R-ET9010A Phase - OC1 - 51
3947	R-EG9027A	0.643	3947	Phase - OC1 - 51
3947	R-EG9027B	0.643	3947	Phase - OC1 - 51
4017	CB-EG9027A		70.0	Tripped by R-EG9027A Phase - OC1 - 51
4017	CB-EG9027B		70.0	Tripped by R-EG9027B Phase - OC1 - 51
5971	R-ST4023	1.016	5971	Phase - OC1 - 51
6041	CB-ST4023		70.0	Tripped by R-ST4023 Phase - OC1 - 51

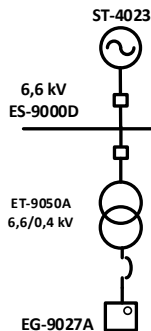
Gambar 4.14 Urutan dan waktu kerja rele resetting

Sesuai hasil perhitungan rele *resetting* pada gambar 4.10 dapat disimpulkan bahwa :

- Rele R-ET9010A-S berfungsi sebagai pelindung trafo terhadap gangguan arus lebih yang terjadi pada bus ES9010A. *Time delay* diatur 0,3s dengan tujuan sebagai rele *backup* ketika terjadi gangguan pada beban tegangan rendah dengan cara memberi waktu tunda untuk pengaman pada beban tersebut bekerja terlebih dahulu.
- Rele R-ET9010A berfungsi sebagai pelindung bus B-ET9010A-P ketika terjadi gangguan arus lebih. *Time delay* diatur 0,1s karena besar arus gangguan maksimum sisi sekunder trafo lebih kecil dari pada arus gangguan minimum pada sisi primer trafo.
- Rele R-EG9027A berfungsi sebagai pelindung generator EG-9027A ketika terjadi gangguan arus lebih.

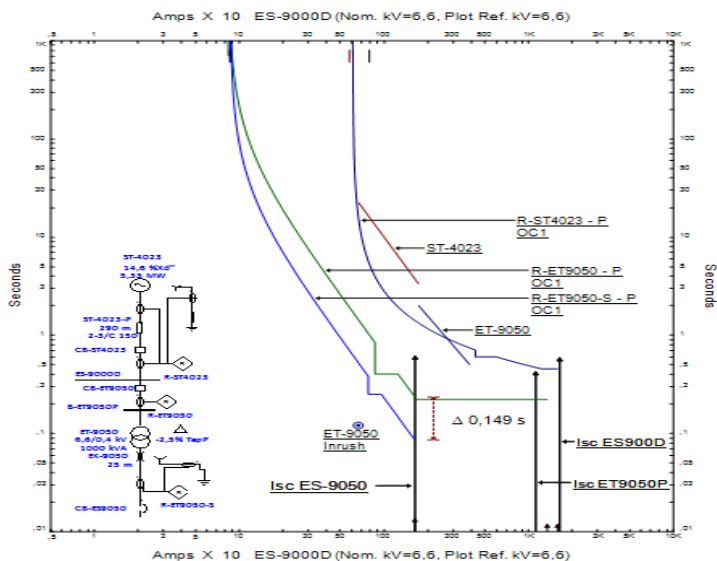
4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3

Koordinasi tipikal 3 merupakan koordinasi rele pengaman arus lebih dari beban ES-9050 Camp LV Swg/MCC sampai dengan generator ST-4023A. Koordinasi tipikal ini dapat dilihat pada gambar 4.11 berikut ini :



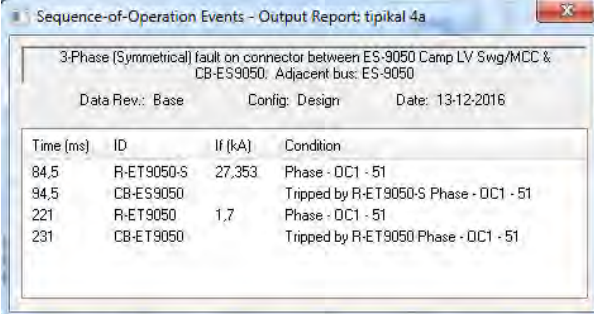
Gambar 4.15 Tipikal koordinasi 3

Untuk melakukan evaluasi terhadap *setting eksisting*, maka perlu disimulasikan dengan cara memberikan gangguan dan melihat apakah rele sudah terkoordinasi dengan baik atau tidak. Setelah dilakukan simulasi terhadap gangguan, dilakukan plot kurva TCC (*Time Current Characteristic*). Hasil simulasi pada rele eksisting terlihat pada gambar 4.13 dibawah ini.



Gambar 4.16 Plot kurva rele pengaman eksisting tipikal 3

Selanjutnya untuk mengetahui urutan dan waktu kerja dari masing - masing rele dapat dilihat dengan cara *sequence viewer* yang ditunjukkan pada gambar 4.3.



Time (ms)	ID	If (kA)	Condition
84,5	R-ET9050-S	27,353	Phase - OC1 - 51
94,5	CB-ES9050		Tripped by R-ET9050-S Phase - OC1 - 51
221	R-ET9050	1,7	Phase - OC1 - 51
231	CB-ET9050		Tripped by R-ET9050 Phase - OC1 - 51

Gambar 4.17 Urutan dan waktu kerja rele eksisting tipikal 3

Dari gambar 4.3 terlihat bahwa antara rele utama dan rele *backup* bekerja dengan *grading time* $221 - 84,5 = 136,5 \text{ ms}$ atau $0,136 \text{ s}$ yang di sebabkan oleh *setting time dial*-nya terlalu rendah sehingga mengenai kurva *invers* dari rele. Hal ini memungkinkan kedua rele tersebut bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, perlu dilakukan *resetting* pada tipikal ini.

Resetting pada tipikal ini dapat dilakukan dengan perhitungan secara manual. Perhitungannya dijabarkan sebagai berikut :

Rele R-ET9050-S

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 80
Curve Type : IEC Standard Invers
FLA : 1443 A
CT Ratio : 2000 / 5
Isc min : 23,46 kA
Isc max : 27,35 kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$
 $1,05 \times 1443 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1443$
 $1515,15 < I_{\text{set}} < 2020,2$
 Dipilih $I_{\text{set}} = 1600 \text{ A}$

$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{1600}{2000} = 0,8$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,3 s

$$t_d = \frac{0,14 \times TDS}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$TDS = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = \frac{0,3 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{27350}{1600} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TDS = 0,372$$

Maka, dipilih TDS sebesar 0,5

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ Beban} < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}}$$

$$1,6 \times 1443 < I_{set} < 0,8 \times 23460$$

$$2308,8 < I_{set} < 18768$$

Dipilih $I_{set} = 13000$

$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{13000}{2000} = 6,5$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,3 detik

Rele R-ET9050-P

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam 40

Curve Type : IEC *Standard Invers*

FLA : 87,48 A

CT Ratio : 500 / 5

Isc min B-ET9010P : 11,29 kA

Isc max B-ET9010S : 13,94 kA

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$$

$$1,05 \times 87,48 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 87,48$$

$$91,85 < I_{\text{set}} < 122,47$$

Dipilih $I_{\text{set}} = 120 \text{ A}$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{120}{500} = 0,24$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,1 s

$$t_d = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$\text{TDS} = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TDS} = \frac{0,1 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{13940}{120} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$\text{TDS} = 0,212$$

Maka, dipilih TDS sebesar 0,58

Instantaneous Pickup

$$I_{\text{sc max bus sekunder}} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$27350 \times \left(\frac{0,4}{6,6} \right) < I_{\text{set}} < 0,8 \times 11290$$

$$1657,57 < I_{\text{set}} < 9032$$

Dipilih $I_{\text{set}} = 2000$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{2000}{500} = 4$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,1 detik

Rele R-ST4023

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 80
Curve Type : IEC Standard Invers
FLA : 582,8 A
CT Ratio : 750 / 5
Isc min ES-9000A : 3,78 kA
Isc max ES-9000A : 4,34 kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA}$
 $1,05 \times 582,8 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 582,8$
 $611,94 < I_{\text{set}} < 815,92$
Dipilih $I_{\text{set}} = 645 \text{ A}$

$$\text{Pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT primary}} = \frac{750}{750} = 1$$

Time dial

Waktu operasi minimum (t_d) = 0,3 s

$$t_d = \frac{0,14 \times \text{TDS}}{2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$
$$\text{TDS} = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$
$$\text{TDS} = \frac{0,3 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{4340}{750} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

TDS = 0,227

Maka, dipilih TDS sebesar 0,26

Instantaneous Pickup

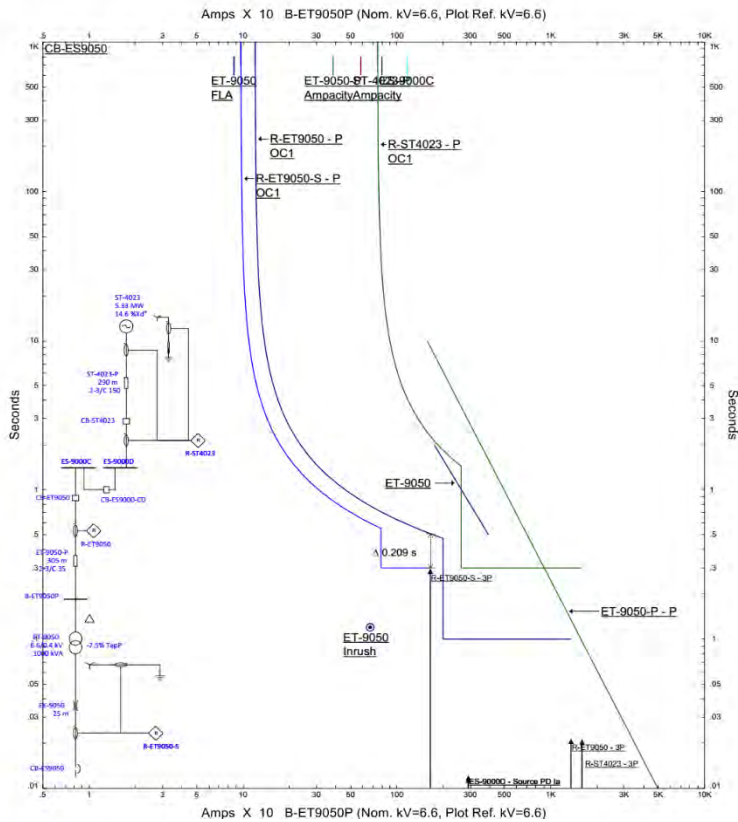
$1,6 \times \text{FLA Beban} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc min}$
 $1,6 \times 582,8 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 3780$
 $932,48 < I_{\text{set}} < 3025$
Dipilih $I_{\text{set}} = 2625$

$$Pickup = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} = \frac{2625}{75} = 3,5$$

Time delay

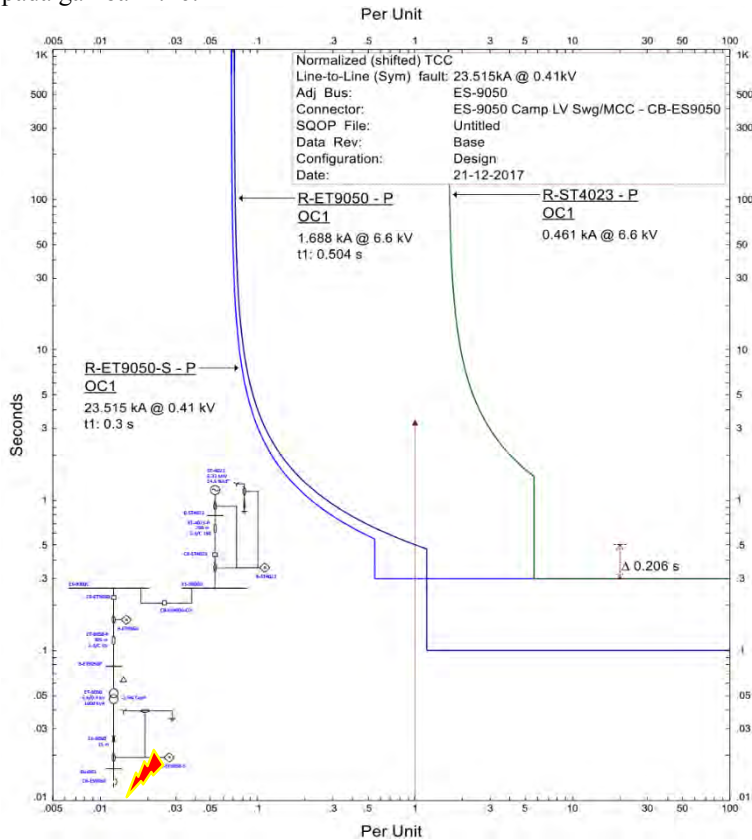
dipilih *time delay* = 0,3 detik

Setelah dilakukan perhitungan manual, maka dilakukan pembuatan plot kurva koordinasi proteksi pada tipikal 3. Pada gambar 4.15 ditunjukkan plot kurva koordinasi pengaman pada tipikal 3 setelah dilakukan *resetting*.



Gambar 4.18 Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 3

Selanjutnya disimulasikan dengan memberi gangguan pada bus ES-9020 sebagai perbandingan antara *eksisting* dan *resetting*. Gambar TCC pada kondisi *resetting* ketika terjadi gangguan dapat dilihat pada gambar 4.15. Sedangkan untuk urutan dan waktu kerja rele dapat dilihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.19 Plot kurva rele pengaman resetting tipikal 3 ketika gangguan pada bus ES-9050

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled				
Line-to-Line (Symmetrical) fault on connector between ES-9050 Camp LV Swg/MCC & CB-ES9050. Adjacent bus: ES-9050				
Data Rev.: Base		Config: Design		Date: 21-12-2017
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	Condition
300	R-ET9050-S	23.515	300	Phase - OC1 - 50
370	CB-ES9050		70.0	Tripped by R-ET9050-S Phase - OC1 - 50
504	R-ET9050	1.688	504	Phase - OC1 - 51
574	CB-ET9050		70.0	Tripped by R-ET9050 Phase - OC1 - 51

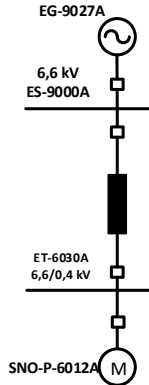
Gambar 4.20 Urutan dan waktu kerja rele resetting

Sesuai hasil perhitungan rele *resetting* pada gambar 4.14 dapat disimpulkan bahwa :

- Rele R-ET9050-S berfungsi sebagai pelindung trafo terhadap gangguan arus lebih yang terjadi pada bus ES9050. *Time delay* diatur 0,3s dengan tujuan sebagai rele *backup* ketika terjadi gangguan pada beban tegangan rendah dengan cara memberi waktu tunda untuk pengaman pada beban tersebut bekerja terlebih dahulu.
- Rele R-ET9050A berfungsi sebagai pelindung bus B-ET9050A-P ketika terjadi gangguan arus lebih. *Time delay* diatur 0,1s karena besar arus gangguan maksimum sisi sekunder trafo lebih kecil dari pada arus gangguan minimum pada sisi primer trafo.
- Rele R-EG9027A berfungsi sebagai pelindung generator EG-9027A ketika terjadi gangguan arus lebih.

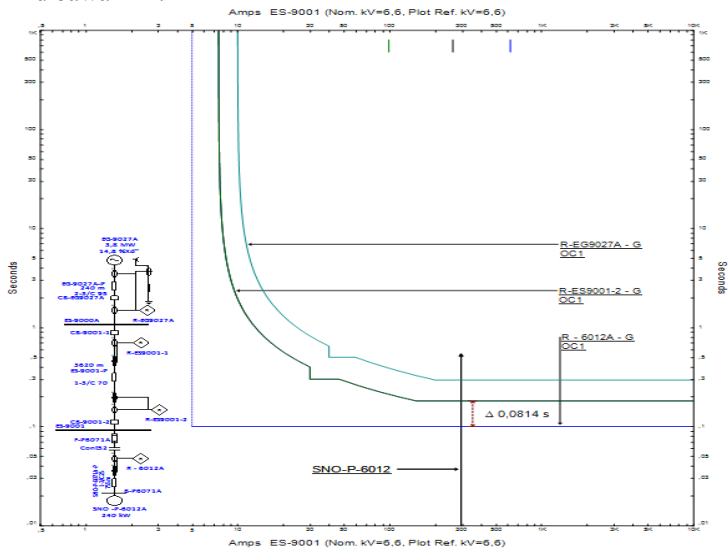
4.5 Koordinasi Rele Arus Gangguan ke Tanah

Selain rele arus gangguan fasa, rele arus gangguan ke tanah juga perlu dikoordinasikan untuk mengatasi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Nilai arus hubung singkat ini dipengaruhi oleh *Neutral Grounding Resistor* (NGR) yang dipasang pada *grounding* peralatan. Pada tipikal ini, rele pengaman yang dikoordinasikan adalah rele R-6012A, rele R-ES9001 dan rele R-EG9027. Koordinasi tipikal ini ditunjukkan oleh gambar 4.19 berikut ini :



Gambar 4.21 Single line diagram tipikal 5 gangguan fasa ke tanah

Untuk melakukan evaluasi terhadap *setting eksisting*, maka perlu disimulasikan dengan cara memberikan gangguan dan melihat apakah rele sudah terkoordinasi dengan baik atau tidak. Setelah dilakukan simulasi terhadap gangguan, dilakukan plot kurva TCC (*Time Current Characteristic*) . Hasil simulasi pada rele eksisting terlihat pada gambar 4.21 dibawah ini.



Gambar 4.22 Plot Kurva Rele Pengaman Arus Gangguan Tanah Eksisting

Dari gambar diatas terlihat bahwa waktu kerja rele pengaman utama dan rele pengaman *backup* hanya selisih 0,0814 s. Hal ini kurang tepat karena akan menyebabkan kedua rele bekerja bersamaan. Selain itu, rele pengaman gangguan fasa ke tanah masih menggunakan kurva *invers*. Oleh karna itu disarankan untuk melakukan *resetting* dan hanya menggunakan kurva waktu instan (*definite time*) saja.

Berikut ini perhitungan parameter-parameter dari masing-masing rele pada tipikal gangguan fasa ke tanah.

Rele R-6012A

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 80
Curve : *Definite Time*
CT Ratio : 50/5
Isc LG : 302 A

Instantaneous Pickup

$$5 - 10\% \times \text{Isc LG} < I_{\text{set}} < 50\% \times \text{Isc LG}$$

$$5\% \times 302 \text{ A} < I_{\text{set}} < 50\% \times 302 \text{ A}$$

$$15,1 \text{ A} < I_{\text{set}} < 151 \text{ A}$$

Dipilih $I_{\text{set}} = 20 \text{ A}$

$$\text{Maka pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primery}} = \frac{20}{50} = 0,4$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,1 detik

Rele R-ES9001

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 40
Curve : *Definite Time*
CT Ratio : 75/5
Isc LG : 302 A

Instantaneous Pickup

$$5 - 10\% \times \text{Isc LG} < I_{\text{set}} < 50\% \times \text{Isc LG}$$

$$5\% \times 302 \text{ A} < I_{\text{set}} < 50\% \times 302 \text{ A}$$

$$15,1 \text{ A} < I_{\text{set}} < 151 \text{ A}$$

Dipilih $I_{\text{set}} = 20 \text{ A}$

$$\text{Maka pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{\text{CT Primery}} = \frac{20}{75} = 0,26667$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,3 detik

Rele R-EG9027A

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 80
Curve : *Definite Time*
CT Ratio : 100/5
Isc LG : 302 A

Instantaneous Pickup

$$5 - 10\% \times I_{sc \text{ LG}} < I_{\text{set}} < 50\% \times I_{sc \text{ LG}}$$

$$5\% \times 302 \text{ A} < I_{\text{set}} < 50\% \times 302 \text{ A}$$

$$15,1 \text{ A} < I_{\text{set}} < 151 \text{ A}$$

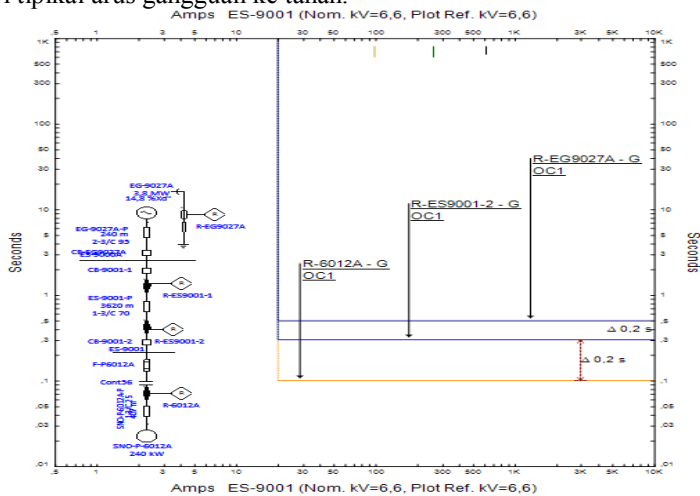
Dipilih $I_{\text{set}} = 20 \text{ A}$

$$\text{Maka pickup} = \frac{I_{\text{set}}}{CT \text{ Primery}} = \frac{20}{100} = 0,2$$

Time delay

dipilih *time delay* = 0,5 detik

Setelah melakukan perhitungan manual seperti diatas, maka selanjutnya dibuatlah plot kurva koordinasi pengaman. Pada gambar 4.20 ditunjukkan plot kurva koordinasi pengaman setelah dilakukan *resetting* dari tipikal arus gangguan ke tanah.



Gambar 4.23 Plot kurva rele pengaman arus gangguan ke tanah resetting

Sesuai hasil *plot* kurva pada gambar 4.22 dapat disimpulkan bahwa :

- Rele arus lebih gangguan ke tanah pada satu level tegangan sebaiknya disamakan dalam penentuan Iset nya. Karena arus gangguan ke tanah pada satu level tegangan nilai arusnya sama.
- Rele arus lebih gangguan ke tanah dikoordinasikan dengan *grading time* antar rele adalah 0,2 s untuk menghindari rele bekerja bersamaan.

4.6 Analisa Nilai Energi Busur Api (*Arc Flash*)

4.6.1 Nilai Energi Busur Api (*Arc Flash*) Kondisi Existing

Untuk dapat mengetahui nilai energi busur api (*arc flash*) di PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro pada kondisi existing dengan simulasi menggunakan software ETAP. Simulasi ini untuk mengetahui energi busur api dilakukan pada semua bus yang ada pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro. Sehingga pada setiap bus dapat diketahui nilai arus bolted fault (Ibf), arus arcing (Ia), fault clearing time (FCT), insiden energi, dan kategori level energi. Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Existing

BUS ID	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm2)	Kategori Level
ES-9000A	16.52	15.9	0.732	22.713	3
ES-9000B	16.52	15.9	0.732	22.713	3
ES-9000C	16.52	15.9	0.732	22.713	3
ES-9000D	16.52	15.9	0.732	22.713	3
ES-9001	3.33	3.293	0.078	0.442	0
ES-6030	3.113	2,16	0.36	1.49	1
ES-9020 Jetty	10.83	5.43	0.13	1.37	1
ES-9010A	68.04	22.44	0.752	16.109	3
ES-9010B	69.74	28	0.33	19.77	3

Tabel 4.3 (Lanjutan) Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Existing

BUS ID	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm2)	Kategori Level
ES-9011A	55.95	22.74	0.907	15.86	3
ES-9011B	58.61	24.32	0.33	17.03	3
ES-9050	27.35	11.16	1.352	50.543	>4

Dari hasil simulasi energi busur api pada kondisi existing di atas, dapat diketahui bahwa terdapat bus dengan nilai energi busur api yang besar yang mencapai kategori level maksimum atau lebih besar dari level 4. Menurut NFPA 70E, energi busur api dengan level maksimum tidak terdapat rekomendasi untuk personal protective equipment (PPE) bagi pekerja. Sehingga besar energi kategori level maksimum harus dapat diturunkan. Dari hasil simulasi tersebut juga dapat diketahui bahwa terdapat bus dengan fault clearing time (FCT) dengan waktu yang sangat cepat. Nilai energi busur api yang kecil dan waktu fault clearing time (FCT) yang cepat ini dikarenakan rele pengaman yang terpasang belum terkoordinasi dengan benar.

4.6.2 Nilai Energi Busur Api (Arc Flash) Kondisi Resetting

Setelah dilakukan resetting pada koordinasi rele arus lebih fasa pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro, maka dapat diketahui nilai dari energi busur api yang mungkin timbul. Untuk mengetahui nilai dari energi busur api dapat dilakukan dengan simulasi pada software ETAP dan perhitungan berdasarkan standar IEEE 1584-2002

Untuk dapat mengetahui nilai energi busur api (arc flash) PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro setelah resetting dapat dilakukan dengan simulasi menggunakan software ETAP. Simulasi ini untuk mengetahui energi busur api pada semua bus yang ada pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro setelah dilakukan resetting. Pada setiap bus dapat diketahui nilai arus bolted fault (Ibf), arus arcing (Ia), fault clearing time (FCT), insiden energi, dan kategori level energi. Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Resetting

BUS ID	Ibf (kA)	Ia (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm2)	Kategori Level
ES-9000A	16.52	15.9	0.813	16.04	3
ES-9000B	16.52	15.9	0.813	16.04	3
ES-9000C	16.52	15.9	0.813	16.04	3
ES-9000D	16.52	15.9	0.813	16.04	3
ES-9001	3.33	3.293	0.37	1.33	1
ES-6030	3.113	2,16	0.36	1.49	1
ES-9020 Jetty	10.83	5.43	0.37	4.48	2
ES-9010A	68.04	22.44	0.37	21.7	3
ES-9010B	69.74	28	0.33	19.77	3
ES-9011A	55.95	22.74	0.33	15.86	3
ES-9011B	58.61	24.32	0.33	17.03	3
ES-9050	27.35	11.16	0.63	16.91	3

4.6.3 Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting dengan Standar IEEE 1584-2002

Selain dari hasil simulasi, nilai energi busur api juga dapat diperoleh dari perhitungan dengan standar IEEE 1584-2002. Nilai yang dicari ialah arus arcing fault (Ia) dan energi insiden busur api (E). Data yang diperlukan untuk perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.5. Untuk jarak/gap antar bus, jarak kerja/working distance, dan X factor digunakan standar IEEE 1584-2002 yang disesuaikan dengan tegangan kerja pada tiap bus.

Tabel 4.5 Data Untuk Perhitungan Energi Busur Api

BUS ID	KV	GAP BUS	WORKING	X FACTOR	ARC TIME	Ibf
		(mm)	DISTANCE	EXPONENT	FCT	
ES-9000A	6.6	124	910	0.973	0.570	16.52
ES-9000B	6.6	124	910	0.973	0.570	16.52
ES-9000C	6.6	124	910	0.973	0.570	16.52

Tabel 4.5 (Lanjutan) Data Untuk Perhitungan Energi Busur Api

ES-9000D	6.6	124	910	0.973	0.570	16.52
ES-9001	6.6	124	910	0.973	0.370	3.33
ES-6030	0.4	30	610	1.473	0.360	3.110
ES-9020	0.4	30	610	1.473	0.370	10.830
ES-9010A	0.4	30	610	1.473	0.370	68.040
ES-9010B	0.4	30	610	1.473	0.330	69.740
ES-9011A	0.4	30	610	1.473	0.330	53.950
ES-9011B	0.4	30	610	1.473	0.330	58.610
ES-9050	0.4	30	610	1.473	0.630	27.350

Perhitungan energi busur api untuk beberapa bus adalah sebagai berikut :

1. Perhitungan energi busur api pada

- a. Perhitungan energi busur api pada tegangan bus kurang dari 1 kV (0,4 kV)

ES-6030

➤ Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(\lg 3,11) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,38)(\lg 26,13) - 0,00304(30) (\lg 3,11)$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(0,493) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(0,493) - 0,00304(30) (0,493)$$

$$\lg I_a = 0,3483$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 2.23 \text{ kA}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081(\lg 0,348) + 0,0011 \times 30$$

$$\lg E_n = 0,258$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 0.552 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{d^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1,5 \times 1,65 \times \left(\frac{0,36}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{455^{1,473}}\right)$$

$$E = 6,238 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 6,238 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 1,49 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9020

➤ Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(\lg 10,83) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(\lg 10,83) - 0,00304(30) (\lg 10,83)$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(1,03) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(1,03) - 0,00304(30) (1,03)$$

$$\lg I_a = 0,78$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 6,02 \text{ kA}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081(\lg 6,02) + 0,0011 \times 30$$

$$\lg E_n = 0,21$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 1,61 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1,5 \times 1,61 \times \left(\frac{0,37}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{455^{1,473}}\right)$$

$$E = 18,72 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 18,72 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 4,47 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9010A

➤ Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(\lg 68,04) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(\lg 68,04) - 0,00304(30) (\lg 68,04)$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(1,83) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,38)(1,83) - 0,00304(30) (1,83)$$

$$\lg I_a = 1,413$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 25,9 \text{ kA}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081(\lg 25,9) + 0,0011 \times 30$$

$$\lg E_n = 0,893$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 7,81 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1,5 \times 7,81 \times \left(\frac{0,37}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{455^{1,473}} \right)$$

$$E = 90,68 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 90,68 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 21,66 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9010B

➤ Perhitungan *Arcing Current* (Ia) :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(\lg 69,74) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(\lg 69,74) - 0,00304(30)(\lg 69,74)$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(1,843) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,38)(1,843) - 0,00304(30)(1,843)$$

$$\lg I_a = 1,42$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 26,41 \text{ kA}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081(\lg 4,87) + 0,0011 \times 130$$

$$\lg E_n = 0,21776$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 7,98 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1,5 \times 7,98 \times \left(\frac{0,33}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{455^{1,473}} \right)$$

$$E = 82,61 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 82,61 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 19,73 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9011A

- Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(\lg 53,95) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(\lg 53,95) - 0,00304(30) (\lg 53,95)$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(1,417) + 0,0966(0,38) + 0,000526(130) + 0,5588(0,38)(1,417) - 0,00304(130) (1,417)$$

$$\lg I_a = 1,33$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 21,54 \text{ kA}$$

- Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081(\lg 1,33) + 0,0011 \times 30$$

$$\lg E_n = 0,81$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 6,399 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1,5 \times 6,399 \times \left(\frac{0,33}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{455^{1,473}} \right)$$

$$E = 66,27 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 66,27 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 11,28 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9011B

- Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(\lg 58,6) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(\lg 58,6) - 0,00304(30) (\lg 58,6)$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(1,417) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(1,417) - 0,00304(30) (1,417)$$

$$\lg I_a = 1,36$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 23 \text{ kA}$$

- Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081(\lg 23) + 0,0011 \times 30$$

$$\lg E_n = 0,837$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 6,87 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1,5 \times 6,87 \times \left(\frac{0,33}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{455^{1,473}} \right)$$

$$E = 71,16 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 71,16 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 16,99 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9050

➤ Perhitungan *Arcing Current* (Ia) :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(\lg 26,13) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(\lg 27,35) - 0,00304(30)(\lg 27,35)$$

$$\lg I_a = -0,097 + 0,662(1,437) + 0,0966(0,4) + 0,000526(30) + 0,5588(0,4)(1,437) - 0,00304(130)(1,437)$$

$$\lg I_a = 1,099$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 12,56 \text{ kA}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081(\lg 1,099) + 0,0011 \times 30$$

$$\lg E_n = 0,553$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 3,57 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1,5 \times 3,57 \times \left(\frac{0,63}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{455^{1,473}} \right)$$

$$E = 70,6 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 70,6 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 16,86 \text{ cal/cm}^2$$

b. Perhitungan energi busur api pada tegangan bus 1-15 kV
(6,6 kV)

ES-9000A

➤ Perhitungan *Arcing Current* (Ia) :

$$\begin{aligned}\lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \\ \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg 16,52 \\ \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \times 1,22 \\ \lg I_a &= 1,2 \\ I_a &= 10^{\lg I_a} \\ I_a &= 15,9 \text{ kA}\end{aligned}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\begin{aligned}\lg E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\ \lg E_n &= -0,555 - 0,113 + 1,081 (\lg 15,9) + 0,0011 \times 124 \\ \lg E_n &= 0,767 \\ E_n &= 10^{\lg E_n} \\ E_n &= 5,84 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ E &= 4,184 \times 1 \times 5,84 \times \left(\frac{0,57}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right) \\ E &= 47,25 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 47,25 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 11,28 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

ES-9000B

➤ Perhitungan *Arcing Current* (Ia) :

$$\begin{aligned}\lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \\ \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg 16,52 \\ \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \times 1,22 \\ \lg I_a &= 1,2 \\ I_a &= 10^{\lg I_a} \\ I_a &= 15,9 \text{ kA}\end{aligned}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\begin{aligned}\lg E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\ \lg E_n &= -0,555 - 0,113 + 1,081 (\lg 15,9) + 0,0011 \times 124 \\ \lg E_n &= 0,767 \\ E_n &= 10^{\lg E_n} \\ E_n &= 5,84 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ E &= 4,184 \times 1 \times 5,84 \times \left(\frac{0,57}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right) \\ E &= 47,25 \text{ J/cm}^2\end{aligned}$$

$$E = 47,25 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 11,28 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9000C

- Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf}$$

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg 16,52$$

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \times 1,22$$

$$\lg I_a = 1,2$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 15,9 \text{ kA}$$

- Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081 (\lg 15,9) + 0,0011 \times 124$$

$$\lg E_n = 0,767$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 5,84 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 5,84 \times \left(\frac{0,57}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$E = 47,25 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 47,25 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 11,28 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9000D

- Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf}$$

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg 16,52$$

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \times 1,22$$

$$\lg I_a = 1,2$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 15,9 \text{ kA}$$

- Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081 (\lg 15,9) + 0,0011 \times 124$$

$$\lg E_n = 0,767$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 5,84 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 5,84 \times \left(\frac{0,57}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$E = 47,25 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 47,25 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 11,28 \text{ cal/cm}^2$$

ES-9001

➤ Perhitungan *Arcing Current* (I_a) :

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf}$$

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg 3,33$$

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \times 0,522$$

$$\lg I_a = 0,517$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$I_a = 3,29 \text{ kA}$$

➤ Perhitungan *Incident Energy* (E) :

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$\lg E_n = -0,555 - 0,113 + 1,081 (\lg 3,29) + 0,0011 \times 124$$

$$\lg E_n = 0,28$$

$$E_n = 10^{\lg E_n}$$

$$E_n = 1,067 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 1,067 \times \left(\frac{0,37}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$E = 5,59 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 5,59 \text{ J/cm}^2 \times 0,2388 = 1,34 \text{ cal/cm}^2$$

Setelah dilakukan perhitungan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002 pada seluruh bus, maka hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting

Bus ID	Arc Time FCT (s)	Arus Bolted Fault (kA)	Arus Arcing (kA)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Kategori Level
ES-9000A	0.570	16.52	15.90	16.10	3

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Energi Busur Api Kondisi *Resetting* (Lanjutan)

ES-9000B	0.570	16.52	15.90	16.10	3
ES-9000C	0.570	16.52	15.90	16.10	3
ES-9000D	0.570	16.52	15.90	16.10	3
ES-9001	0.370	3.33	3.29	1.34	1
ES-6030	0.360	3.110	2.23	1.49	1
ES-9020 Jetty	0.370	10.830	6.02	4.47	2
ES-9010A	0.370	68.040	25.90	21.66	3
ES-9010B	0.330	69.740	26.41	19.73	3
ES-9011A	0.330	53.950	21.54	15.83	3
ES-9011B	0.330	58.610	23.00	16.99	3
ES-9050	0.630	27.350	12.56	16.86	3

4.6.4 Perhitungan Flash Protection Boundary

Dari hasil perhitungan besar insiden energi di atas, maka dapat dihitung *protection boundary* dari bus tersebut. *Protection boundary* ialah batasan daerah kerja atau jarak aman pekerja yang bekerja disekitar daerah bertegangan. Jarak aman pekerja ini merupakan batasan jarak dari titik busur api dimana pekerja masih aman meskipun tanpa memakai *personal protective equipment* (PPE). Perhitungan ini menggunakan insiden energi sebesar 5,0 J/cm² berdasarkan *flash protection boundary* pada IEEE 1584-2002. Berikut ini perhitungan *flash protection boundary* pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro.

1. Perhitungan *flash protection boundary* dengan tegangan di bawah 15 kV

ES-9000A

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 5,85 \times \left(\frac{0,57}{0,2} \right) \times \left(\frac{455^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 9153,48 \text{ mm}$$

$$D_B = 9,15 \text{ m}$$

ES-9000B➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 5,85 \times \left(\frac{0,57}{0,2} \right) \times \left(\frac{455^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 9153,48 \text{ mm}$$

$$D_B = 9,15 \text{ m}$$

ES-9000C➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 5,85 \times \left(\frac{0,57}{0,2} \right) \times \left(\frac{455^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 9153,48 \text{ mm}$$

$$D_B = 9,15 \text{ m}$$

ES-9000D➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 5,85 \times \left(\frac{0,57}{0,2} \right) \times \left(\frac{455^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 9153,48 \text{ mm}$$

$$D_B = 9,15 \text{ m}$$

ES-9001➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 1,65 \times \left(\frac{0,35}{0,2} \right) \times \left(\frac{455^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 1021,11 \text{ mm}$$

$$D_B = 1,02 \text{ m}$$

ES-6030

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 1,65 \times \left(\frac{0,37}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 1337,47 \text{ mm}$$

$$D_B = 1,3 \text{ m}$$

ES-9020 Jetty

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 0,55 \times \left(\frac{0,37}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 708,84 \text{ mm}$$

$$D_B = 0,71 \text{ m}$$

ES-9010A

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 7,81 \times \left(\frac{0,37}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 4326,76 \text{ mm}$$

$$D_B = 4,3 \text{ m}$$

ES-9010B

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 7,98 \times \left(\frac{0,33}{0,2} \right) \times \left(\frac{455^{1,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 4095,21 \text{ mm}$$

$$D_B = 4,1 \text{ m}$$

ES-9011A

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 6,34 \times \left(\frac{0,33}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{11,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 3256,02 \text{ mm}$$

$$D_B = 3,3 \text{ m}$$

ES-9011B

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 6,87 \times \left(\frac{0,33}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 3700,49 \text{ mm}$$

$$D_B = 3,7 \text{ m}$$

ES-9050

➤ Perhitungan *Flash Protection Boundary* :

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 3,57 \times \left(\frac{0,35}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{1,473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,473}}$$

$$D_B = 3680,86 \text{ mm}$$

$$D_B = 3,7 \text{ m}$$

4.6.5 Perbandingan Besar Nilai Energi Busur Api

Setelah dilakukan simulasi energi busur api pada kondisi existing dan resetting, serta perhitungan energi busur api pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro maka dapat dilakukan perbandingan dari hasil simulasi dan hasil perhitungan tersebut. Perbandingan besar energi busur api dapat dilihat pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Perbandingan Besar Insiden Energi dan Kategori Level Busur Api Kondisi Existing, Resetting dan Hitungan

BUS ID	<i>Existing</i>		<i>Resetting</i>		
	Insiden Energi (cal/cm ²)	Level	Simulasi Insiden Energi (cal/cm ²)	Hitungan Insiden Energi (cal/cm ²)	Level
ES-9000A	22.713	3	16.04	16.10	3
ES-9000B	22.713	3	16.04	16.10	3
ES-9000C	22.713	3	16.04	16.10	3
ES-9000D	22.713	3	16.04	16.10	3
ES-9001	0.442	0	1.33	1.34	1
ES-6030	1.49	1	1.49	1.49	1
ES-9020 Jetty	1.37	1	4.48	4.47	2
ES-9010A	16.109	3	21.7	21.66	3
ES-9010B	19.77	3	19.77	19.73	3
ES-9011A	15.86	3	15.86	15.83	3
ES-9011B	17.03	3	17.03	16.99	3
ES-9050	50.543	>4	16.91	16.86	3

Dari perbandingan nilai insiden energi dan kategori level busur api di atas, terdapat bus yang mengalami peningkatan dan ada pula yang mengalami penurunan insiden energi setelah dilakukan resetting. Hal ini dipengaruhi oleh waktu operasi rele dalam mengamankan gangguan atau fault clearing time (FCT). Dimana semakin lama waktu operasi pada rele, maka semakin besar insiden energi yang timbul.

Untuk bus yang mengalami peningkatan setelah resetting, hal ini dikarenakan rele pada kondisi existing memiliki waktu operasi yang belum terkoordinasikan dengan baik. Masih terdapat rele dengan waktu operasi yang terlalu cepat dari waktu yang seharusnya, dan terdapat rele yang masih belum bekerja secara berurutan dari beban menuju ke generator. Setelah dilakukan koordinasi rele, maka rele mengalami peningkatan waktu operasi, sehingga mengakibatkan bus mengalami

peningkatan nilai insiden busur api, contohnya seperti pada bus MCC-6 yang mengalami peningkatan nilai insiden energi dari 0,58 cal/cm² menjadi 4,45 cal/cm². Tetapi hal ini tetap diperbolehkan karena dengan begitu dapat diketahui nilai insiden energi yang sebenarnya, sehingga dapat direkomendasikan PPE yang tepat untuk pekerja.

Sedangkan untuk bus yang mengalami penurunan nilai insiden energi setelah resetting, ini karena koordinasi proteksi yang benar pada sistem keistrikan dapat mengurangi besar nilai insiden energi busur api. FCT pada rele lebih cepat dari kondisi existing dan sudah sesuai dengan waktu yang seharusnya. Seperti pada bus Station 1-A yang mengalami penurunan nilai energi dari 126,7 cal/cm² dengan level maksimum yang menjadi 23,76 cal/cm² dengan level tiga. Penurunan level tersebut sudah sesuai dengan level pada standar NFPA 70E.

Dari tabel diatas juga dapat dilihat perbandingan nilai insiden energi hasil simulasi dengan ETAP dan hasil perhitungan dengan standar IEEE 1584-2002 pada kondisi resetting. Dari hasil yang didapatkan dapat dilihat bahwa nilai insiden energi dari perhitungan dengan standar IEEE 1584-2002 tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi dengan menggunakan ETAP.

4.6.6 Perbandingan *Flash Protection Boundary*

Setelah dilakukan simulasi pada kondisi *existing* dan *resetting*, serta perhitungan *flash protection boundary* pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro, maka dapat dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dan hasil perhitungan yang telah dilakukan. Perbandingan besar nilai *flash protection boundary* dapat dilihat pada Tabel 4.8

Tabel 4.8 Perbandingan Flash Protection Boundary Kondisi Existing, Resetting dan Hitungan

Bus ID	<i>Existing</i> FPB (m)	<i>Resetting</i> Simulasi FPB (m)	<i>Resetting</i> Hitungan FPB (m)
ES-9000A	16.613	13.13	13.19
ES-9000B	16.613	13.13	13.19
ES-9000C	16.613	13.13	13.19
ES-9000D	16.613	13.13	13.19
ES-9001	0.328	1.02	1.02

Tabel 4.8 (Lanjutan) Perbandingan Flash Protection Boundary Kondisi Existing, Resetting dan Hitungan

ES-6030	0.71	0.71	0.71
ES-9020 Jetty	0.667	1.49	1.49
ES-9010A	5.652	4.35	4.36
ES-9010B	4.08	4.08	4.10
ES-9011A	5.598	3.52	3.53
ES-9011B	3.69	3.69	3.70
ES-9050	4.466	3.67	3.68

Dari tabel perbandingan di atas dapat dilihat bahwa pada kondisi resetting jarak flash protection boundary menjadi lebih jauh dan lebih dekat. Hal ini dikarenakan flash protection boundary dipengaruhi oleh besar insiden energi. Semakin besar insiden energi maka semakin jauh jarak aman untuk pekerja, dan semakin kecil insiden energi maka semakin dekat jarak aman untuk pekerja. Untuk hasil simulasi dan perhitungan flash protection boundary, jarak yang didapatkan tidak terlalu berbeda, hampir mendekati dan bahkan bernilai sama. Dari hasil flash protection boundary tersebut maka dapat diketahui batas jarak aman bagi pekerja yang tidak memakai PPE, jika melebihi batas tersebut maka pekerja wajib memakai PPE yang sesuai dengan level insiden energi

4.6.7 Penentuan Personal Protective Equipment

Personal Protective Equipment (PPE) ialah alat pelindung diri (APD) bagi pekerja yang wajib digunakan saat bekerja pada daerah yang bertegangan dan beresiko timbul busur api. Berdasarkan standar NFPA 70E dengan memperhatikan kategori bahaya atau resiko busur api, maka *personal protective equipment* (PPE) dikategorikan berdasarkan besar insiden energi pada busur api.

Berdasarkan analisa busur api pada PT Pertamina JOB Medco Energi Tomori Field Senoro pada kondisi *existing*, diketahui bahwa terdapat bus atau daerah kerja yang memiliki kategori level insiden energi di luar standar NFPA 70E (lebih besar dari level insiden energi yang ditentukan NFPA), sehingga untuk PPE tidak dapat ditentukan. Setelah dilakukan *resetting* pada rele pengaman, nilai insiden busur api dapat diturunkan dan sesuai dengan level insiden energi standar NFPA 70E. *Personal Protective Equipment* (PPE) pada setiap daerah kerja berbeda-beda sesuai dengan level insiden energi yang mungkin timbul pada daerah

tersebut. Penentuan PPE sesuai dengan bus dan level insiden energi dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Dengan mengetahui besar insiden energi busur api di daerah kerja bertegangan, maka pekerja wajib untuk menggunakan PPE yang sesuai saat bekerja di daerah bertegangan tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengurangi dampak dari busur api yang mungkin timbul

Tabel 4.9 Penentuan PPE Berdasarkan Kategori Level Busur Api

Bus ID	Kategori Level	PPE
ES-9001	1	Pakaian tahan api Pelindung kepala Pelindung mata Sepatu <i>safety leather</i> Pelindung telinga Celana panjang
ES-6030	1	
ES-9020 Jetty	2	Pelindung wajah dan kepala Pakaian tahan api Sarung tangan <i>leather</i> Sepatu <i>safety leather</i> Pelindung mata Pelindung telinga Celana panjang
ES-9000A	3	Flash suit hood Pelindung wajah dan kepala Sarung tangan <i>leather</i> Sepatu <i>safety leather</i> Pakaian tahan api Pelindung mata Pelindung telinga Celana panjang
ES-9000B	3	
ES-9000C	3	
ES-9000D	3	
ES-9010A	3	
ES-9010B	3	
ES-9011A	3	
ES-9011B	3	
ES-9050	3	

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil *setting* koordinasi rele pengaman pada PT Pertamina Job Medco Energi Tomori Field Senoro yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada *setting eksisting* arus lebih gangguan fasa tipikal 1, 2 dan 3, terdapat kekeliruan yaitu pada *setting time dial*-nya. Kesalahan ini menyebabkan rele utama dan rele *backup* bekerja bersama karena *grading time*-nya kurang dari 0,2s.
2. Pada *setting eksisting* rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 5, terdapat kekeliruan yang sama dengan tipikal 1,2 dan 3 yaitu pada *setting time dial*-nya. Sehingga telah dilakukan *resetting* terhadap koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah yang diambil dari beban motor 6,6 kV hingga generator. Pada perhitungan tipikal ini ditentukan nilai $I_{set} = 20A$ dengan *grading time* 0.2s. Sehingga apabila terjadi hubung singkat 1 fasa ke tanah maka rele ini dapat bekerja dengan baik.
3. Pada kondisi *existing*, terdapat nilai insiden energi busur api (*arc flash*) yang menunjukkan level maksimum atau melebihi kategori level menurut NFPA 70E, contohnya pada bus ES-9050. Hal ini dikarenakan koordinasi rele pengaman belum sesuai dengan standar IEEE-242, sehingga FCT terlalu lama dan mengakibatkan nilai insiden energi menjadi sangat besar.
4. Setelah dilakukan *resetting* koordinasi pada rele pengaman, terjadi penurunan level insiden energi busur api dari level maksimal menjadi level 3. Contohnya pada ES-9050, sebelum *resetting* nilai energinya 50.543 cal/cm^2 dengan kategori level maksimal menjadi $16,91 \text{ cal/cm}^2$ dengan kategori level 3. Hal ini dikarenakan waktu operasi rele dalam mengamankan gangguan (FCT) semakin cepat.
5. Setelah dilakukan *resetting* koordinasi pada rele pengaman, juga terjadi kenaikan level insiden energi busur api, seperti pada bus ES-9020 Jetty yang mengalami kenaikan nilai insiden energi dari $1,37 \text{ cal/cm}^2$ menjadi $4,48 \text{ cal/cm}^2$. Hal ini tetap diperbolehkan karena dengan begitu dapat diketahui nilai insiden energi yang sebenarnya

5.2 Saran

1. Pada *setting* rele yang terdapat pada tugas akhir ini, dapat dijadikan pertimbangan dan referensi untuk melakukan *resetting* yang sebenarnya.
2. Rele pengaman gangguan tanah disarankan menggunakan kurva instan atau *definite time* saja.
3. Dari *resetting* rele pengaman dengan mempertimbangkan energi busur api dapat dijadikan pertimbangan dan referensi dalam melakukan setting rele pengaman pada plant.
4. Diharapkan untuk selanjutnya dapat dilakukan studi untuk mengurangi dan menurunkan nilai insiden energi dengan menggunakan rele differential.
5. Setelah diketahui nilai energi pada setiap daerah kerja, maka diharapkan para pekerja dapat menggunakan APD sesuai dengan kategori level insiden energi pada daerah kerja tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001.
2. Wahyudi, ”*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004
3. Cahier Technique No. 158. “*Calculation of Short Circuit Currents*”, Shneider Electric, 2005.
4. Gers, Juan M., dan Holmes, Edward J., “*Protection of Electrical Distribution Network 2nd Edition*”, The Institution of Electrical Engineers, London, Ch. 5, 2004
5. PT. PLN (Persero). “*Konsep Dasar Sistem Proteksi Gardu Induk*”. Pusat Pendidikan dan Pelatihan: Indonesia, 2014.
6. Wakil, Abdul. “*Studi Koordinasi Proteksi Pada PT Pertamina Job Medco Energi Tomori Field Senoro*”. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya, 2017
7. Ilham Rosyadi, M. “*Analisis Koordinasi Proteksi dengan mempertimbangkan arc flash pada PT Vico Indonesia, Kalimantan Timur*”. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya, 2017.
8. Hurst, Randolph W., “*Electrical Safety and Arc Flash Handbook, volume 5*”, National Safety, Inc., 2009.
9. Pfeiffer, John C., “*Arc Flash Article*”, Pfeiffer Engineering Co., Inc., 2008
10. Service Manual Type MCGG “*Overcurrent Relays for Phase and Earth Fault*” Alstom
11. IEEE Std. 1584-2002., “*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Rizanni Pradana Abiddien. Penulis lahir di Surabaya pada tanggal 25 April 1993. Penulis mulai menempuh pendidikan di SDN Kertajaya XIII No.219 Surabaya pada tahun 1999, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 19 Surabaya pada tahun 2005. Setelah lulus dari SMPN 19 Surabaya, penulis melanjutkan pendidikannya ke SMAN 17 Surabaya pada tahun 2008. Lulus dari sekolah menengah atas pada tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikan di jurusan D3 Teknik Elektro ITS. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan di jurusan

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), dengan mengambil bidang studi Sistem Tenaga. Penulis berdomisili di Surabaya dan dapat dihubungi melalui email rizannipradana@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan